ISSN 1405-0471

Madera y Bosques



OTOÑO 2013 19(3)
Xalapa, Ver.

MADERA y BOSQUES
Vol. 19 Núm. 3 **Otoño de 2013**

Madera y Bosques, es una publicación del Instituto de Ecología, A.C., que edita la Red de Ambiente y Sustentabilidad. Los trabajos que publica tratan los temas de tecnología de productos forestales y del campo forestal en general, con énfasis en ecología forestal y manejo forestal. Se aceptan trabajos en español, inglés y ocasionalmente en otros idiomas. Su objetivo principal es constituirse en un medio de difusión de la investigación científica. Asimismo, publica contribuciones técnicas y estados del arte que incidan en el medio nacional e internacional. Es una publicación cuatrimestral que aparece en primavera, en verano y en otoño.

COMITÉ EDITORIAL

Editor, Raymundo Dávalos Sotelo

Dr. Patrick J. Pellicane
Dr. Martín A. Mendoza Briseño
Dr. Ariel Lugo
M.C. Freddy Rojas Rodríguez
Dr. Alejandro Velázquez Martínez

Dr. Lázaro R. Sánchez Velázquez - Universidad Veracruzana, México.

Dr. Amador Honorato Salazar - Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.

Dr. Ezequiel Montes Ruelas - Universidad de Guadalajara. México.

Dr. José Návar Cháidez - Instituto Politécnico Nacional - Durango. México.

Dra. Carmen de la Paz Pérez Olvera - Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa. México.

Dr. Hugo Ramírez Maldonado - Universidad Autónoma de Chapingo. México.

Dra. María de los Ángeles Rechy de von Roth - Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

Dr. Víctor L. Barradas Miranda - Instituto de Ecología, UNAM. México.

Producción Editorial:
Reyna Paula Zárate Morales
Aída Pozos Villanueva

CONSEJO EDITORIAL

Dr. Óscar Aguirre Calderón - Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

M. I. Miguel Cerón Cardeña - Universidad Autónoma de Yucatán. México.

M.C. Mario Fuentes Salinas - Universidad Autónoma de Chapingo. México.

Dr. Rubén F. González Laredo - Instituto Tecnológico de Durango. México.

Dr. Raymond P. Guries - University of Wisconsin. EUA.

Madera y Bosques, Vol. 19 Núm. 3 de 2013. Número de Certificado de Reserva otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor: 04-2012-102312120900-102. Número de Certificado de Licitud de Título: 12906. Número de Certificado de Licitud de Contenido: 10479. Domicilio de publicación: Carretera Antigua a Coatepec núm. 351. El Haya. 91070. Xalapa, Ver., México. Imprenta: Tavera Hermanos, S.A. de C.V. Av. Lázaro Cárdenas 3052. Col. Chapultepec Sur. 58260, Morelia, Michoacán.
La suscripción anual para 2012 es de $450.00+$225.00 para gastos de envío al interior de la República y $50.00 USD al extranjero (no incluye gastos de envío). Precio por ejemplares sueltos $200.00 y $20.00 USD, respectivamente. Incluye costos de envío por correo aéreo. Suscripciones en México en International Magazine Subscriptions, Tenochtitlan núm. 26 L10 M7, Ampl. Tlacuitlapa, 01650 México, D.F. México, Tel/Fax (55) 5643-2939, ce:mmaximomx@yahoo.com.mx. Donaciones e intercambios, en el Instituto de Ecología, A.C., al c.e:libros@inecol.edu.mx. La reproducción total o parcial de los artículos podrá hacerse con el permiso expreso de los editores. Esta revista forma parte de los índices y portales de difusión ISI Web of Science (Science Citation Index Expanded), Journal of Citation Records (JCR), Revistas Mexicanas de Investigación en Ciencia y Tecnología (IRMICyT) del CONACYT, Redalyc, Dialnet, Periódica, Índice Iberoamericano de Información en Ciencia y Tecnología, SCOPUS, Actualidad Iberoamericana, CAB Forest Products Abstracts, Latindex y Seriunam.

MADERA Y BOSQUES

Vol. 19 Núm. 3 Otoño de 2013

CONTENIDO



Nuestra portada: Restauración de cárcavas con *Pinus pseudostrobus-Pisolithus tinctorius*, en Atécuaro, municipio de Morelia, Michoacán, México

Autor: Mariela Gómez Romero, Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

MADERA Y BOSQUES

Vol. 19 Num. 3 Autumn 2013

TABLE OF CONTENTS



Our cover: Restoration of carcavas with *Pinus pseudostrobus-Pisolithus tinctorius*, in Atécuaro, municipality of Morelia, Michoacán, México.
Author: Mariela Gomez Romero, Institute of Chemistry-Biological Investigations, Michoacana University of San Nicholas de Hidalgo.

EDITORIAL

El último número de 2013 aparece en el contexto de un gran debate nacional sobre las reformas estructurales promovidas por el gobierno de la República que se han presentado como un avance para el país y que son de gran trascendencia. En realidad, las reformas planteadas, algunas de ellas todavía en discusión en el Congreso de la Unión, sí tienen el potencial de transformar la manera de abordar algunos de los temas más relevantes para la nación, como el laboral –reforma elaborada desde principios del año–, el educativo –de promulgación muy reciente–, la reforma hacendaria –apenas aprobada– y la energética –que todavía se analiza en las cámaras legislativas federales. De su impacto y eficiente aplicación dependerá el avance del modelo de desarrollo adoptados en este país. Se podrán llamar exitosas si logran que el estándar de vida de los habitantes se incremente, que la sociedad en su conjunto tenga un desarrollo y crecimiento más igualitario, que se abatan los índices de pobreza y se reduzcan de manera significativa los niveles de violencia que aquejan a amplias secciones del territorio mexicano. En caso contrario, no pasarán de ser meros intentos de progreso con muy buenas intenciones pero con escasos resultados prácticos. Habrá que seguir su desarrollo con atención.

En este número se incluyen seis temas de investigación de gran interés e importancia. El primero trata sobre el aprovechamiento del recurso maderable tropical nativo en una comunidad ubicada en la Reserva de la Biósfera Selva El Ocote, en Chiapas, México. En dicho estudio se realizaron encuestas semi-estructuradas a los ejidatarios y se colectaron ejemplares para la identificación de las especies. Se determinó un total de 35 especies maderables nativas, incluidas en 31 géneros y 24 familias. Entre los principales usos que la comunidad le da a las especies maderables está extracción de leña y postes para cercado, la elaboración de herramientas de trabajo y la elaboración de muebles, construcción y reparación de casas, todas ellas de importancia en la vida de la comunidad.

El segundo trabajo describe la respuesta de Cedrela odorata *L. a diversos inoculantes micorrízicos procedentes de dos ecosistemas tropicales. Aquí se realizó un bioensayo con diferentes fuentes de inóculo procedentes de dos ecosistemas tropicales donde se distribuye esta especie en el estado de Veracruz. Las variables evaluadas fueron: biomasa seca aérea y radicular, altura, diámetro, número de foliolos, número de esporas y porcentaje de colonización. Los resultados mostraron diferencia estadística en las variables de crecimiento de los inoculantes provenientes de la selva mediana subperennifolia (SMS). Aquí se demuestra la fuerte relación micorrízica entre los hongos y* C. odorata*; ante ello, se sugiere reproducir y utilizarlos en la producción de plántulas a fin de lograr una mejor adaptación al establecerlas en condiciones naturales.*

El tercer artículo presenta la relación de variables físicas en la productividad de Pinus arizonica *y* Pinus engelmannii *en el sur de Chihuahua, Méx. Se utilizó el índice de sitio (IS) para identificar la influencia de variables de suelo, clima y relieve sobre el crecimiento de las dos especies. Con los modelos de IS se identificó la calidad de estación de cada parcela muestreada. Se realizó un análisis de discriminante canónico (ADC) para identificar diferencias multivariadas entre calidades de estación y un análisis de varianza para identificar la influencia de las variables físicas en el crecimiento de las especies. El método empleado predijo con precisión el crecimiento de ambas especies. El ADC mostró que existen diferencias multivariadas entre las calidades de estación, con alta influencia de la*

pendiente, disección vertical, profundidad de suelo y temperaturas. De acuerdo con el análisis de varianza, los valores para las variables de mayor influencia sobre la mejor calidad de estación fueron profundidad de suelo, pendiente, temperatura mínima y temperatura máxima promedio. Estos valores pueden ser de gran utilidad para construir modelos espaciales de productividad en los estados de Chihuahua y Durango, México.

El cuarto es un trabajo sobre el establecimiento de Pinus pseudostrobus *Lindl. en tres condiciones de propagación y trasplante en cárcavas desprovistas de vegetación en una localidad del estado de Michoacán, México. La primera condición corresponde a plantas de procedencia conocida, germinadas y propagadas en condiciones controladas, con y sin inóculo con el hongo ectomicorrízico* Pisolithus tinctorius *(Pers.) Coker et Couch. Como una segunda condición, ambos lotes fueron trasplantados con adición de sustrato fértil (fibra de coco, corteza de árbol y agrolita) en las cepas. La tercera condición fue una reforestación convencional con plantas de la misma especie. Los resultados muestran que los pinos que fueron plantados bajo las primeras condiciones presentaron mayor crecimiento y supervivencia que los pinos de la segunda reforestación. La supervivencia de los pinos inoculados fue la más alta, seguida por los de la misma plantación sin inóculo y los de la segunda reforestación. La inoculación se plantea como una estrategia útil en proyectos de restauración de sitios severamente degradados y erosionados, con buenas expectativas de incrementar el éxito en los programas de reforestación.*

El quinto manuscrito se enfoca a tableros de partículas fabricados con residuos industriales de la madera de Pinus patula*. Los objetivos son manufacturar tableros aglomerados de partículas homogéneos a dos niveles de densidad, determinar sus propiedades físico-mecánicas y evaluar los resultados bajo las normas alemana y venezolana. La absorción de agua promedio de los tableros a ambas densidades cumple con lo estipulado en las normas. La variación del espesor (hinchamiento) promedio por inmersión en agua para los tableros con mayor densidad cumple por lo exigido en ambas normas. Respecto de las propiedades mecánicas, tanto el módulo de ruptura en flexión estática como la tensión perpendicular (adhesión interna) para ambos niveles de densidad superan el valor mínimo aceptado en las normas, demostrando que los residuos industriales de la madera de* P. patula *presentan buenas características tecnológicas para la fabricación de tableros de partículas de densidad media.*

Finalmente, el sexto trabajo plantea las opciones reales para determinar el turno óptimo en sistemas silvo-pastoriles a través de un análisis de inversión. El trabajo propone analizar y valorar desde la perspectiva económica-financiera el momento óptimo de cosecha en un sistema silvo-pastoril utilizando las Opciones Reales (OR) como herramienta para la toma de decisiones estratégicas. Esta se basa en un proceso estocástico para la proyección de precios mientras que el Valor Actual Neto (VAN) utiliza una tasa fija en todo el proyecto. Los resultados mediante OR indican cuando es rentable talar para obtener el mayor beneficio desde el punto de vista económico. Estos trabajos ilustran de manera muy adecuada diversos problemas a los que se enfrentan quienes hacen el manejo y aprovechamiento de recursos forestales en Latinoamérica y ofrecen interesantes y útiles soluciones a dichos problemas. Estemos seguros que serán de valor para los lectores.

Raymundo Dávalos Sotelo
Editor

EDITORIAL

The last issue of the year 2013 will come to light in the context of a great national debate on structural reforms promoted by the Government of the Republic. These reforms have been presented as a breakthrough for the country, and which are of a great importance. In reality, such reforms, some of them still under discussion in the Congress of the Union, have indeed the potential to transform the way of addressing some of the most relevant issues for the nation, as is the case with the labor issue, reform elaborated since the beginning of the year, the educational theme, of very recent enactment, the taxes on revenue, just adopted and, the reform about energy, which still is reviewed and under analysis in the federal legislative chambers. The progress of the development model adopted in this country will depend largely on their impact and efficient implementation. We may call them successful if they manage to increase the standard of living of the inhabitants, if the society as a whole has more egalitarian growth, if poverty rates are diminished and if the levels of violence that plague broad sections of the Mexican territory are reduced significantly. Otherwise, they will not pass from being mere attempts to progress with very good intentions but with few practical results. It will be necessary to follow its development closely.

Six themes of research of great interest and importance are included in this number. The first one deals with the use of the native tropical timber resource in a community located on the reserve of the biosphere Selva El Ocote in Chiapas, Mexico. In this study, semi-structured surveys were conducted with the ejidatarios and specimens were collected for the identification of the species. A total of 35 native timber species were identified, including 31 genera and 24 families. Among the main uses that the community gives to the timber resources is extraction of firewood and fence poles, the manufacturing of working tools and the production of furniture, construction and house-repairs, all of which are of importance in the life of the community.

The second work describes the response of Cedrela odorata *L. to different mycorrhizal inoculators from two tropical ecosystems. Here, a bioassay was conducted with different sources of inoculum from two tropical ecosystems where this species is distributed in the State of Veracruz. The variables evaluated were aerial and root dry biomass, height, and diameter, number of leaflets, spore number and percentage of colonization. The results showed statistical difference in the growth variables of inoculants from medium rainforest. In this study, the strong relationship between fungi mycorrhizal and* C. odorata *is shown; in view of that, it is suggested to reproduce and use them in the production of seedlings in order to achieve a better adaptation to the establishment of trees in natural conditions.*

The third article presents the relation of physical variables in the productivity of Pinus arizonica *and* Pinus engelmannii *in the south of Chihuahua, Mex. The site index (SI) was used to identify the influence of variables of soil, climate and surface relief on the growth of two species. Is models identified the quality of each sampled plot station. A canonical discriminant analysis (CDA) was performed to identify multivariate differences between qualities of station, and an analysis of variance to identify the influence of the physical variables in the growth of the species. The method predicted precisely the growth of both species. The CDA showed multivariate differences between the qualities of station, with high influence of the slope, vertical dissection, depth of soil and temperatures. According to the analysis of variance, the values for the variables of greater influence on the best quality of station were*

depth of soil, slope, minimum temperature and maximum average temperature. These values can be useful for building spatial models of productivity in the States of Chihuahua and Durango, Mexico.

The fourth manuscript is a work on the establishment of Pinus pseudostrobus Lindl. in three conditions of propagation and transplant, on gullies devoid of vegetation in a town in the state of Michoacán, Mexico. The first condition corresponds to plants of known provenance, germinated and propagated in controlled conditions, with and without inoculum with the ectomycorrhizic fungus Pisolithus tinctorius *(Pers.) Coker et Couch. As a second condition, both batches were transplanted with addition of fertile substrate (coconut fibre, bark, tree and agrolite) strains. A third condition was a conventional reforestation with plants of the same species. The authors evaluated the height, diameter at the height of the base, coverage, number of branches and percentage of survival. The results show that pine trees that were planted under the first conditions showed better growth and survival than the second reforestation pines. The survival of the inoculated pine was the highest, followed by the same plantation without inoculum and the second reforestation. Inoculation is presented as a useful strategy in projects of restoration of sites severely degraded and eroded, with good expectations of increasing success in reforestation programs.*

The fifth manuscript focuses on particleboards made of industrial waste from wood of Pinus patula*. This study, conducted in Venezuela and Costa Rica, is a proposal to use industrial waste of sawmill's that use of* Pinus patula*, for the production of chipboard. The objectives are manufacturing agglomerate boards with homogeneous particles at two levels of density, to determine their physical-mechanical properties and to evaluate the results under German and Venezuelan standards. Average water absorption for boards at both densities complies with provisions of the rules. The average variations of the thickness (swelling) by immersion in water for boards with higher density, comply with requirements by both standards. Mechanical properties, with regard to both the modulus of rupture in static bending and tension perpendicular to the grain (internal bond) for both levels of density, exceed the minimum value accepted by the standards, demonstrating that industrial waste from wood of P. patula has good technological characteristics for medium density particle board manufacturing.*

Finally, the sixth paper presents the real options to determine the optimal turn in silvopastoral systems through an analysis of investment. The work proposes to analyze and assess from the perspective of economic-financial the optimum time of harvest in a silvopastoral system using real options (RO) as a tool for strategic decision-making. It is based on a stochastic price projection process while the net present value (NPV) uses a fixed rate throughout the project. Results through RO indicate when it is profitable to cut to get the most benefit from the economic point of view.

These works illustrate very properly various problems facing those who carry out the management and exploitation of forest resources in Latin America and provide interesting and useful solutions to these problems. We are sure that they will be of value to the readers of the journal.

Raymundo Davalos-Sotelo
Editor

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Aprovechamiento del recurso maderable tropical nativo en la comunidad de Emilio Rabasa, Reserva de la Biosfera Selva El Ocote, Chiapas, México

Native tropical timber resource use in the community of Emilio Rabasa, at the Selva El Ocote Biosphere Reserve in Chiapas, Mexico

Carolina Orantes-García,[1] Miguel Ángel Pérez-Farrera,[1]
Carlos Uriel del Carpio-Penagos[2] y César Tejeda-Cruz[3]

RESUMEN

El presente estudio tuvo como finalidad conocer el aprovechamiento de los recursos maderables tropicales nativos por parte de la comunidad Emilio Rabasa, ubicada en la Reserva de la Biosfera Selva El Ocote, en el estado de Chiapas, México. Se realizaron encuestas semiestructuradas a 30 ejidatarios y se colectaron ejemplares para la identificación de las especies. Se determinó un total de 35 especies maderables nativas, incluidas en 31 géneros y 24 familias. Las principales especies maderables multipropósito mencionadas fueron el bojón (*Cordia alliodora* (R. & P.) Oken), el palo amarillo (*Terminalia obovata* (R. & P.) Steud) la caoba (*Swietenia macrophylla* G. King), el jolocín (*Heliocarpus donnell-smithii* Rose), el cedro (*Cedrela odorata* M. Roem. King) y el copalchi (*Croton guatemalensis* Lotsy). Entre los principales usos que la comunidad le da a las especies maderables está, 38% la extracción de leña y postes para cercado, 17% para la elaboración de herramientas de trabajo y 16% para la elaboración de muebles, construcción y reparación de casas.

PALABRAS CLAVE
Árboles multipropósito, flora nativa, recurso forestal, selva Zoque, trópico de México.

ABSTRACT

This study aimed to identify the use of native tropical timber resources in the Emilio Rabasa community located in the Ocote Forest Biosphere Reserve, in Chiapas state, Mexico. 30 semi-structured surveys were conducted with ejidatarios “land-owners”, and several specimens were collected for their identification. A total of 35 native timber species were determined, included in 31 genera and 24 families.The main multipurpose timber species mentioned were bojón (*Cordia alliodora* (R. & P.) Oken), palo amarillo (*Terminalia obovata* (R. & P.) Steud), mahogany (*Swietenia macrophylla* G. King), the jolocín (*Heliocarpus donnell-smithii* Rose), cedar (*Cedrela odorata* M. Roem. King) and copalchi (*Croton guatemalensis* Lotsy). Among the main uses that the community gives these timber species are 38% for extraction of firewood and fence posts, 17% for making tools and 16% for making furniture, construction and houses repair.

KEY WORDS
Multipurpose trees, native flora, resources, Zoque forest, tropic of Mexico.

1 Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH)-Facultad de Ciencias Biológicas, Chiapas, México. C.e.: c_ orantes@hotmail.com
2 UNICACH-Centro de Estudios Superiores de México y Centroamérica.
3 UNICACH-Facultad de Ingenierías.

INTRODUCCIÓN

México es uno de los países del mundo con mayor diversidad biológica y cultural; se ubica entre los cinco primeros países llamados "megadiversos", los cuales albergan entre 60% y 70% de la diversidad biológica conocida del planeta (Mittermeier *et al*., 2000; Francis y Currie 2003; Conabio, 2006). Posee 10% de la flora del mundo, con un estimativo de 30 000 especies de plantas vasculares, ocupando el cuarto lugar a nivel mundial en riqueza de plantas endémicas y nativas (Villaseñor y Espinosa-García, 2004; Conabio, 2006). De acuerdo con Rzedowski (1992), en el territorio mexicano se encuentran alrededor de 2500 especies de árboles nativos, que constituyen un reservorio de recursos bióticos de valor actual y potencial por los múltiples productos y beneficios ambientales que de ellos se derivan, motivo por el cual su presencia y permanencia es fundamental para contrarrestar los efectos de la deforestación así como para garantizar la sustentabilidad de la tierra (Gligo, 1993; Vázquez *et al*., 1999; Mardocheo *et al.,* 2001).

Aunque en la actualidad la gestión sostenible de los bosques ha sido ampliamente adoptada como una política y un objetivo de la administración pública, las altas tasas de pérdida y degradación del bosque se siguen produciendo en muchas áreas. Las actividades humanas como la tala, la ganadería, los cultivos, el desarrollo de infraestructura y el uso del fuego, están causando la pérdida generalizada de biodiversidad, restringiendo el progreso del manejo sostenible de los bosques. Sólo en México, la tasa anual de deforestación (237 000 ha) es la causa principal de la pérdida de vegetación en los ecosistemas tropicales (Viana *et al*., 1997; Witmore, 1997; Dirzo, 2001). Ante tal problemática, existe una urgente necesidad de herramientas que logren proporcionar una evaluación integrada de los impactos humanos sobre la diversidad biológica forestal y que puedan apoyar la toma de decisiones relacionadas con el uso del bosque (Newton *et al*., 2009).

La Reserva de la Biosfera Selva El Ocote (Rebiso) en el estado de Chiapas (estado cuya riqueza arbórea es de 1400 a 1500 taxa; González-Espinosa *et al*., 2004), con una superficie total de 101 288 – 15 - 12,5 ha (Semarnat, 2000), es considerada de especial importancia biológica y cultural por su cercanía con las selvas de los Chimalapas en Oaxaca y Uxpanapa en Veracruz, que en su conjunto forman un corredor biológico que constituye la selva zoque (Gómez-Pompa y Dirzo, 1995). La Rebiso protege uno de los centros de diversidad biológica más importantes de México y del mundo, ya que se encuentra ubicada en una zona de transición de dos provincias neotropicales, la Pacifiquense y la Tehuantepecana (Vásquez y March, 1996). Además, es un espacio donde se satisfacen necesidades básicas de comunidades campesinas locales, para lo cual hacen uso de los recursos forestales nativos, lo que puede ocasionar un deterioro de dichos recursos (Moreno, 2009). En la Rebiso están presentes numerosas especies forestales de importancia económica (maderable, medicinal, comestible, forrajera y ornamental), no obstante, hoy en día no se cuenta con estudios exhaustivos al respecto. Las contribuciones al conocimiento de dicha flora son todavía incipientes, pocos son los autores (Miranda, 1952; Vásquez-Sánchez, 1988 y Ochoa-Gaona, 1996) que han llevado a cabo algunos trabajos, principalmente estudios florísticos. El presente trabajo es el primer estudio que registra el aprovechamiento del recurso maderable nativo dentro de la Rebiso, como un primer paso para establecer programas y evaluaciones integrales del manejo de estas especies por los habitantes de las comunidades asentadas en el área de amortiguamiento de la misma.

OBJETIVO

El presente estudio tuvo como finalidad conocer el aprovechamiento de los recursos maderables tropicales nativos por parte de la comunidad de Emilio Rabasa, localizada en la Reserva de la Biosfera Selva El Ocote, en el estado de Chiapas, México.

MATERIALES Y MÉTODO

Área de estudio

La Rebiso se ubica dentro de los municipios de Cintalapa, Ocozocoautla, Tecpatán y Jiquipilas, en el estado de Chiapas, México, entre los paralelos 16º45´42" y 17º09´00" de latitud norte y entre los meridianos 93º21´20" y 93º47´00" de longitud oeste (Semarnat, 2000). Dentro de la zona de amortiguamiento de la Rebiso se encuentra la localidad de estudio, Emilio Rabasa, la cual pertenece al municipio de Ocozocoautla (Fig. 1). El paisaje predominante en la zona corresponde al de las montañas del norte, constituidas por sierras y serranías de altitud variable entre los 750 msnm y 1500 msnm. De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (1980), el grupo climático presente en la zona corresponde al cálido subhúmedo con lluvias abundantes en verano (Aw_1) y con una precipitación total anual que varía entre 1500 mm y 2500 mm, con una temperatura media anual de 22 °C.

Según Rzedowski (1994), la vegetación presente en la Rebiso corresponde a cuatro asociaciones vegetales:

a) Selva alta perennifolia, predominan las especies de chicozapote (*Manilkara zapota* (L.) Van Royen), caoba (*Swietenia macrophylla* G. King), cedro (*Cedrela odorata* M. Roem. King) y mojú (*Brosimum alicastrum* Sw.).

b) Selva alta o mediana subperennifolia, se encuentran especies como el molinillo (*Quararibea gentlei* Lundell), el copalillo (*Bursera bipinnata* (Sessé & Mociño) Engl.), el palo mulato (*Bursera simaruba (L.)* Sarg.) y el frijolillo (*Pithecellobium arboreum* (L.) Urban).

c) Selva mediana o baja perennifolia, las especies representativas son: palo de coleto (*Oreopanax peltatus* Linden ex Regel) y memelita (*Clusia flava* Jacq.).

d) Vegetación secundaria, en donde las especies representativas son el corcho colorado (*Belotia mexicana* (DC.) Schum.), la yerba buena de monte (*Pilea pubescens* Liebm.), el guarumbo (*Cecropia peltata* L.) y el macús (*Calathea allouia* Aubl.).

De acuerdo con la información proporcionada por los habitantes de la comunidad de Emilio Rabasa, los primeros pobladores llegaron en 1970 en busca de terrenos para la agricultura, provenientes de los municipios de Villaflores, Ocozocoautla, Jiquipilas y Tecpatán, Chiapas. En 1981 se fundó el ejido Emilio Rabasa a través de un decreto federal, con una extensión de 840 ha. La comunidad está integrada por 150 habitantes 82 mujeres y 68 hombres. Los habitantes son mestizos, hablan castellano y 70% saben leer y escribir. Noventa por ciento de los habitantes de la comunidad son ejidatarios que tienen en promedio de 20 ha a 30 ha de terreno cada uno, mientras que el 10% restante son personas que viven en la comunidad que sólo poseen una casa y un solar.

Dentro de las actividades económicas de la comunidad se encuentra la agricultura, principalmente la siembra de maíz (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), que es practicada por 37% de los productores; 32% se dedica a la producción de café *(Coffea arabica* L.), 22% a la apicultura y únicamente 9% practica la gana-

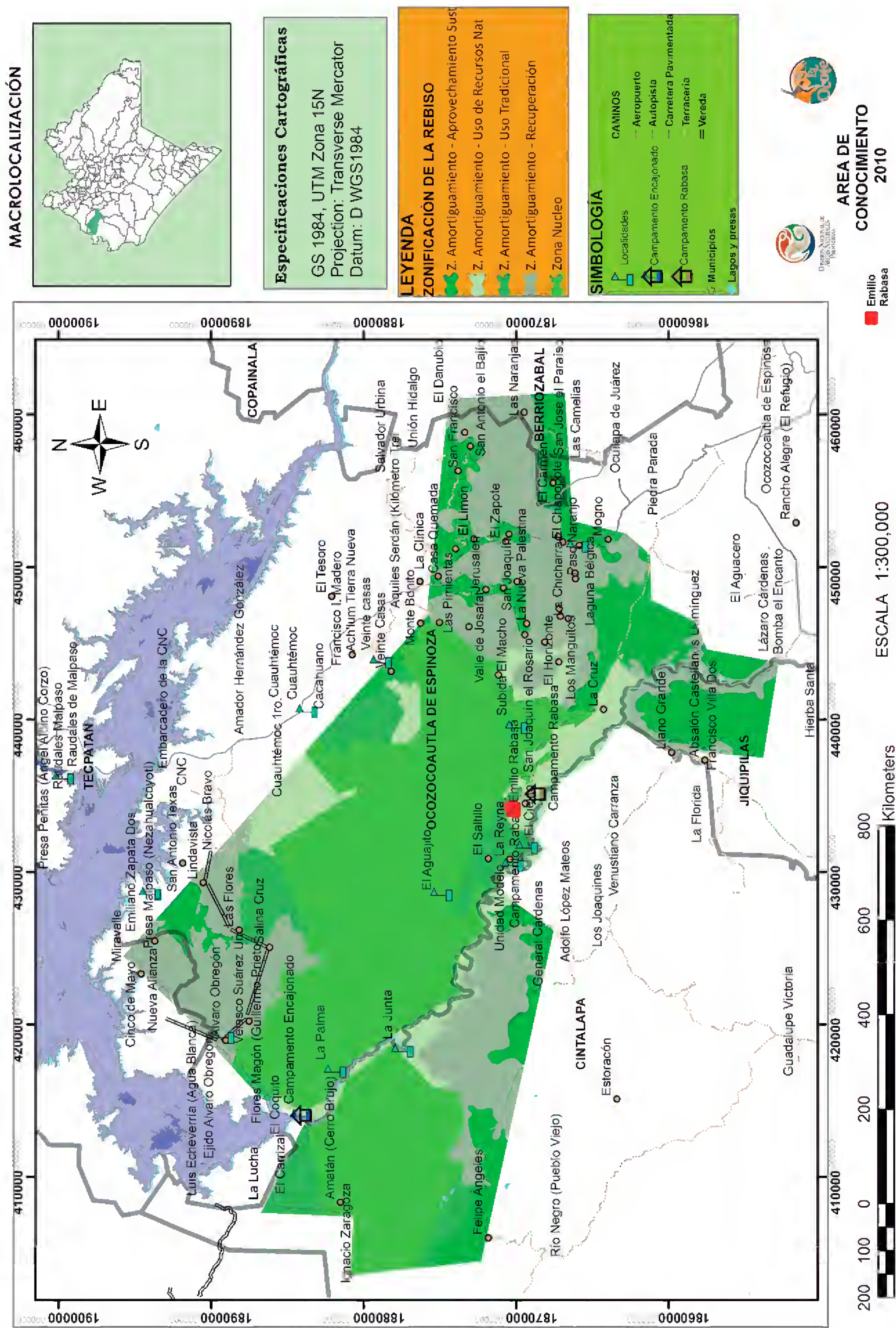


Figura 1. Comunidad de Emilio Rabasa en la zona de amortiguamiento Reserva de la Biosfera Selva el Ocote, Ocozocoautla, Chiapas (Semarnat, 2000).

dería ovina; tales actividades son para autoconsumo. La cantidad de terreno destinada a la producción por cada productor oscila entre las 2 ha y 3 ha con un rendimiento de 800 kg/ha para el maíz y 500 kg/ha para el frijol. El cultivo del café *(Coffea arabica)* es la segunda actividad productiva comercial en importancia dentro de la comunidad por la superficie ocupada, el rendimiento promedio de este cultivo es de 700 kg/ha a 1000 kg/ha de café convencional. El rendimiento ha aumentado con la utilización de técnicas orgánicas, la comercialización la realizan con introductores externos.

La apicultura constituye una alternativa productiva complementaria a la agricultura, al mismo tiempo que es una actividad compatible con la conservación de los recursos forestales de la comunidad. El producto principal es la miel, que es vendida a productores externos de la cabecera municipal de Ocozocoautla, Chiapas. Actualmente los productores están en un proceso de capacitación y ampliación.

Método

Se aplicaron encuestas semiestructuradas para la recopilación de la información (Geilfus, 1997). Las encuestas se realizaron a los 30 ejidatarios de Emilio Rabasa, con edades entre los 20 y 70 años. Esta herramienta permitió indagar con respecto a las formas de uso del recurso forestal maderable, especies utilizadas, técnicas empleadas y percepción. El trabajo se acompañó de la observación directa así como de conversaciones y cuatro recorridos por las zonas de aprovechamiento junto con los informantes. Los datos recopilados se registraron en una hoja de cálculo de Microsoft Excel para facilitar su análisis, mediante una estadística descriptiva.

De acuerdo con la clasificación de Rzedowski (1994), se determinó el tipo de vegetación donde se encontraron las especies maderables nativas. Siguiendo la metodología de Lot y Chiang (1986), se realizaron colectas de ejemplares de las especies arbóreas nativas para su posterior identificación, con ayuda de bibliografía especializada (Martínez, 1979; Breedlove, 1981; Niembro, 1986; Rzedowski, 1992; Gentry, 1996; Miranda, 1998; Ricker y Douglas, 1998; Pennington y Sarukhán, 2005; Flora Mesoamericana, 2006), los ejemplares identificados fueron depositados en el Herbario Eizi Matuda (HEM) de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

RESULTADOS

Historia de aprovechamiento

De acuerdo con las encuestas, el aprovechamiento forestal dio inicio en 1970 cuando los primeros pobladores provenientes de los municipios de Villaflores, Ocozocoautla, Jiquipilas y Tecpatán, Chiapas se establecieron en los terrenos selváticos en los que actualmente se ubica la comunidad. Estos primeros pobladores talaban y quemaban las especies maderables nativas para abrir campos de siembra de cultivos como el maíz (*Z. mays.*) y frijol (*P. vulgaris*); aunado a ello, la madera sólo se destinaba para la construcción de las casas y no se comercializaba debido a que no existían caminos para transportarla.

A inicios de 1975, el aprovechamiento forestal maderable se intensificó con la apertura de la carretera y el establecimiento de un aserradero privado dentro de los terrenos de la comunidad. A partir de ello, los habitantes de la comunidad pudieron vender los árboles de maderas preciosas como el cedro (*Cedrela odorata*) y la caoba (*Swietenia macrophylla*) a la empresa maderera. En 1980, después de haber cerrado el aserradero, los habitantes

de la comunidad comenzaron a explotar la madera como principal actividad, misma que presentó una alternativa de generación de recursos económicos inmediatos. Dicha madera era comprada, principalmente por introductores provenientes de la cabecera municipal de Ocozocoautla. Actualmente, la explotación de la madera está regulada por la misma comunidad a través de un reglamento interno y por las instituciones vinculadas con este sector; la madera es utilizada en la mayoría de los casos para reparación de las casas, leña y cercado; existen programas de reforestación en zonas degradadas.

Aprovechamiento forestal

A través de las encuestas se registró un total de 35 especies maderables nativas, distribuidas en 31 géneros y 24 familias (Tabla 1). Ochenta por ciento (n=35) se encuentran distribuidas en selva alta perennifolia y el 20% restante en la selva mediana subperennifolia.

Tabla 1. Número total de familias, géneros y especies forestales maderables nativas aprovechadas en el ejido Emilio Rabasa, Rebiso, Chiapas.

Familias	*Géneros*	*Especies*
Amaranthaceae	1	1
Bombacaceae	2	2
Boraginaceae	1	1
Burseraceae	1	3
Cochlospermaceae	1	1
Combretaceae	1	1
Euphorbiaceae	1	1
Fabaceae	3	3
Flacurtiaceae	1	1
Lauraceae	1	1
Meliaceae	3	5
Moraceae	1	1
Myrsinaceae	1	1
Myrtaceae	1	1
Ochnaceae	1	1
Polygonaceae	1	1
Ramnaceae	1	1
Rubiaceae	2	2
Rutaceae	1	1
Sapindaceae	1	1
Sapotaceae	1	1
Simaroubaceae	1	1
Tiliaceae	1	1
Ulmaceae	2	2
TOTAL 24	31	35

De acuerdo con los encuestados, en Emilio Rabasa, 70% (n=35) de las especies maderables utilizadas son multipropósito (Tabla 2). Se registraron 10 usos que se les da a las especies: leña, postes, cercas vivas, construcción de casas, elaboración de muebles, herramientas de trabajo, medicinal, comestibles, melíferas y forrajeras, en donde 38% (n=35) de las especies son utilizadas en la extracción de leña y postes para cercado, 17% para la elaboración de herramientas de trabajo, 16% para la elaboración de muebles, construcción y reparación de casas, 12% son melíferas, 8% son utilizadas en la medicina tradicional, 5% como cercos vivos y 4% como comestible y forrajera.

De 43% (n=35) de la especies maderables nativas se utilizan sólo las ramas y troncos para la obtención de leña, cercado de corrales y herramientas de trabajo, de 16% se usa la hoja, tal es el caso de la colita de borrego (*Picramnia* sp.),la pimienta (*Pimienta dioica*), cuyas hojas son utilizadas en la medicina tradicional y el mojú (*Brosimum alicastrum*) que se aprovecha como forraje; de 15% de los árboles como el bojón (*Cordia alliodora*), el palo amarillo (*Terminalia obovata),* la caoba (*Swietenia macrophylla*), el cedro (*Cedrela odorata*) y el hormiguillo (*Platymiscium dimorphandrum*) se utiliza todo el árbol para diferentes fines; de 11% se aprovecha la corteza, como el palo mulato (*Bursera simaruba),* el copalillo (*Bursera bipinnata*) y el copal (*Bursera excelsa*); de 8% de las especies se utiliza únicamente la flor, como el sospó (*Pseudobombax ellipticum*) y el pumposhuiti (*Cochlospermum vitifolium);* y de 7% de los árboles maderables nativos se aprovechan los frutos y las semillas, tal es el caso del mojú (*Brosimum alicastrum*), el chicozapote (*Manilkara zapota*) y la pimienta (*Pimienta dioica*).

Las especies como el cedro (*Cedrela odorata*), la caoba (*Swietenia macrophylla)*, el bojón (*Cordia alliodora)*, el mojú (*Brosimum alicastrum*), el palo amarillo (*Terminalia obovata),* el jolocín (*Heliocarpus donnell-smithii*) y el copalchi (*Croton guatemalensis)*, son las que presentan mayor frecuencia de uso (100%, n=30), mientras que especies como el espino (*Acacia pennatula* L.), el frijolillo (*Pithecellobium arboreum* (L.) Urban), el pumposhuiti (*Cochlospermum vitifolium* Willd. ex Spreng*)* y el sospó (*Pseudobombax ellipticum* (H.B.K.) Dugand) son utilizadas en menor medida (10%) por los habitantes de la comunidad.

De acuerdo con los encuestados, en el ejido Emilio Rabasa, los hombres integrantes del núcleo familiar realizan el aprovechamiento de las especies maderables nativas. La madera es cortada *in situ*; para la extracción de leña y postes, la madera es cortada mediante hacha y llevada a la comunidad por las mujeres, mientras que para la construcción de viviendas, fabricación de muebles y puertas, se utiliza principalmente la motosierra y es transportada mediante arrastre por caballos.

Los árboles son seleccionados según el uso; para leña, postes y herramientas de trabajo se seleccionan árboles de 2 años o más, con d.a.p. (diámetro a la altura del pecho) entre 0,10 m y 0,30 m, altura de 2 m a 5 m; para construcción de casas y muebles se seleccionan árboles de 5 años en adelante, con d.a.p. de 0,50 m a 1,50 m y altura de 15 m a 40 m.

Los encuestados también indicaron que en la comunidad la venta de madera es casi nula, ya que dicha actividad está regulada por la misma comunidad a través de un reglamento interno para la explotación forestal y por las instituciones vinculadas con este sector (Profepa, Conanp y Semarnap). Sin embargo, también aclararon que aún existen pobladores que venden árboles en pie, con precios que van de MXP$1000 a MXP$4000, con

Tabla 2. Especies forestales nativas multipropósito del ejido Emilio Rabasa, Rebiso, Chiapas.

Nombres científicos	*Nombres comunes*	*Usos*
Brosimum alicastrum Sw.	Mojú	medicinal, forraje, comestible, muebles, construcción de casa, herramientas de trabajo
Bursera bipinnata (Sessé & Mociño) Engl.	Copalillo	melífera, cercos vivos, medicinal
Bursera excelsa (Schltd & Chan)	Copal	medicinal, herramientas de trabajo
Bursera simaruba (L.) Sarg.	Palo mulato	medicinal, cercos vivos
Cedrela odorata M. Roem.	Cedro	melífera, construcción de casas, muebles, poste
Coccoloba cozumelensis Hemsl.	Carnero	leña, poste, herramientas de trabajo
Cordia alliodora (R.& P.) Oken	Bojón	melífera, leña, poste, muebles, construcción de casas, herramientas de trabajo
Croton guatemalensis Lotsy	Copalchi	melífera, herramientas de trabajo, leña
Cupania glabra Sw.	Quiebra hacha	poste, herramientas de trabajo, construcción de vigas de casas
Faramea occidentalis (L.) A. Rich.	Huesito	leña, poste, herramientas de trabajo
Guarea glabra Vahl	Cedrillo amarillo	melífera, leña, poste,
Guarea grandifolia DC.	Cedrillo rojo	melífera, leña, poste,
Heliocarpus donnell-smithii Rose	Jolocín	leña, melífera, herramientas de trabajo
Karwinskia calderoni Stand	Palo de rosa	herramientas de trabajo, poste, leña
Manilkara zapota (L.) Van Royen	Chicozapote	medicinal, comestible, muebles, herramientas de trabajo
Picramnia sp.	Colita de borrego	melífera, poste, herramientas de trabajo
Pimienta dioica (L.) Merril	Pimienta	comestible, medicinal, poste
Platymiscium dimorphandrum J.D. Smith	Hormiguillo	construcción de casa, muebles, madera
Quararibea gentlei Lundell	Molinillo	cercos vivos, poste, herramientas de trabajo
Swietenia macrophylla G. King	Caoba	medicinal, muebles, reparación de casas, herramientas de trabajo
Terminalia obovata (R.& P.) Steud.	Palo amarillo	poste, leña, muebles, construcción y reparación de casas, herramientas de trabajo
Zuelania guidonia Britt. et Millsp.	Palo de paragüita	herramientas de trabajo, construcción de casas, poste

compradores de la cabecera municipal de Ocozo-coautla, Chiapas. Las principales especies arbóreas nativas que se comercializan se enlistan en la tabla 3.

DISCUSIÓN

En Emilio Rabasa, más de 70% de los árboles nativos se aprovechan para la extracción de leña, elaboración de herramientas de trabajo, postes para cercado, elaboración de muebles, construcción y reparación de casas. Estos resultados coinciden con Torres (2004), al sugerir que el uso de leña para el hogar representa, en pleno siglo XXI, 40% de la demanda de energía doméstica nacional.

Las especies arbóreas nativas encontradas en Emilio Rabasa como el cedro (*Cedrela odorata*), la caoba (*Swietenia macrophylla*), el bojón (*Cordia alliodora*), el chicozapote (*Manilkara zapota*), el mojú (*Brosimum alicastrum*) y el palo amarillo (*Terminalia obovata*), son mencionadas en diversos estudios como especies multipropósito para reforestación, restauración y plantaciones forestales. Entre estos estudios se pueden señalar el realizado en el área de Jurisdicción, CDMB (Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga), Santander, Colombia, (2002) en el que se llevó a cabo una evaluación para determinar el potencial de especies forestales nativas para la reforestación, identificándose algunas especies forestales nativas promisorias en diferentes formaciones ecológicas. Entre estas especies se encuentran el frijolito (*Schizolobium parahybum),* cedro (*Cedrela odorata*), anime (*Protium* sp.), pardillo (*Cordia alliodora*), balso (*Ochroma pyramidale*), caimo (*Pouteria* sp.), cedrón (*Simaba cedron*), chingalé (*Jacaranda copaia*) y ojite (*Brosimun alicastrum),* entre otras.

Tabla 3. Especies arbóreas nativas comercializadas, mencionadas por los habitantes de Emilio Rabasa.

Nombre científico	*Nombres comunes*	*Uso*
Cedrela odorata	Cedro	Muebles, puertas
Coccoloba cozumelensis	Carnero	Leña, poste
Cordia alliodora	Bojón	Muebles, construcción
Croton guatemalensis	Copalchi	Poste
Faramea occidentalis	Huesito	Leña
Heliocarpus donnell-smithii	Jolocín	Leña
Swietenia macrophylla	Caoba	Muebles, puertas
Terminalia obovata	Palo amarillo	Muebles, construcción
Zuelania guidonia	Palo de paragüita	Poste

Por su parte, Rivas (2003) explicó que en El Salvador se realizaron importantes investigaciones sobre el establecimiento y manejo de plantaciones forestales en las que se identificaron 49 especies forestales con potencial productivo; entre las especies que se mencionan en dichos trabajos están el almendro de río (*Andira inermis*), balsa (*Ochroma lagopus*), bálsamo (*Miroxylon balsamun*), barillo (*Calophylum brasiliense*), caoba (*Swietenia macrophylla*) carao (*Cassia grandis*), caulote (*Guazuma ulmifolia*), cedro (*Cedrela odorata*) y pajarito (*Cordia alliodora*). De ellas, *S. macrophylla, C. Odorata* y *C. alliodora,* fueron especies con mayor número de menciones en la comunidad Emilio Rabasa.

Por su parte, el CATIE (2006) llevó a cabo el proyecto llamado "Developing best practices for seed sourcing of planted and natural regeneration in theneotropics", conocido como Proyecto Seedsource, en la región comprendida desde el sur de México hasta Panamá. En dicho proyecto se registraron un total de 50 especies forestales prioritarias del trópico americano, de las cuales la caoba (*Swietenia macrophylla),* el cedro *(Cedrela odorata),* el pajarito (*Cordia alliodora*) y el copalchi (*Croton guatemalensis*) resultaron tener la mayor demanda para fines de reforestación comercial. Estas especies coinciden con las mencionadas por los habitantes de la comunidad aquí estudiada como especies de maderables nativas que son comercializadas a escala local.

Otros trabajos que concuerdan con las especies multipropósito encontradas en la comunidad en estudio, son los realizados por Wightman *et al*. (2006) en la Amazonía Peruana, en donde la producción maderera es una de las actividades económicas más importantes. Por ello desarrollaron un manual en el que listan 42 especies vegetales de importancia maderable, de las cuales se estudiaron varios aspectos de cultivo. Entre las especies mencionadas están: cedro (*Cedrela odorata),* amasisa (*Erythrina ulei),* bolaina negra (*Guazuma ulmifolia),* cacao (*Theobroma cacao),* caoba (*Swietenia macrophylla),* copalchi (*Croton guatemalensis*), copaiba (*Copaifera officinalis),* cumala (*Virola calophylla)* y estoraque (*Myroxylon balsamum).*

Igualmente, Palacios *et al*. (2008) llevaron a cabo un estudio sobre el conocimiento del aprovechamiento de los recursos naturales, en las comunidades de Chintadó, Doña Josefa y Yuto, en la cuenca media del río Atrato, Chocó, en Colombia. En dicho estudio encontraron que las principales especies maderables extraídas son caoba (*Swietenia macrophylla)*, chanú *(Humiriastrus procenum*), cedro (*Cedrela odorata)* y lirio (*Couma macrocarpa).* Lo que concuerda con el estudio en la comunidad Emilio Rabasa en donde se encontró a *S. macrophylla* y *Cedrela odorata* como especies maderables nativas extraídas.

En México, Rzedowski (1992) encontró la presencia de aproximadamente 9000 especies de árboles y arbustos nativos en el país. De éstos, Vázquez y Cervantes (1993) realizaron una búsqueda bibliográfica de aquellos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación; durante dicha investigación seleccionaron 233 especies leñosas nativas de México. El criterio para la selección de estas especies se centró básicamente en que fueran especies multipropósito y con características para ser empleadas en programas de restauración y reforestación en las diferentes regiones ecológicas del país. Entre las 233 especies se encuentran *Brosimum alicastrum, Bursera bipinnata, Bursera simaruba, Cedrela odorata*, *Coccoloba cozumelensis, Cordia alliodora, Croton guatemalensis, Faramea occidentales, Swietenia macrophylla, Terminalia obovata, Manil-*

kara zapota, Pimienta dioica, Platymiscium dimorphandrum, mencionadas por los habitantes de Emilio Rabasa como especies multipropósito.

Posteriormente, Benítez *et al*. (2004) realizaron estudios sobre árboles multiusos nativos de Veracruz para reforestación, restauración y plantaciones, algunas de las especies encontradas fueron el canshán (*Terminalia obovata*), molinillo (*Quararibea gentlei*), chicozapote (*Manilkara zapota*), caoba (*Swietenia macrophylla*), guapaque (*Dialium guianense*), mojú (*Brosimum alicastrum)*, cedro rojo (*Cedrela odorata*), ceiba (*Ceiba pentandra*), baqueta (*Ulmus mexicana*) y sonzapote (*Licania platypus*). Las cuales también son reportadas en la comunidad de Emilio Rabasa.

Ahora bien, en la comunidad Emilio Rabasa las ramas y los troncos son las partes más usadas de los árboles. El principal aprovechamiento de los árboles se realiza con el fin de obtener materiales para combustible de uso doméstico, construcción y postes para cercados. Ello significa que el uso de la madera sigue siendo fundamental para la vida diaria de las comunidades rurales, proporcionando techo, alimento y apoyando las actividades productivas, y explica el por qué las ramas y troncos son las partes más usadas. Como lo mencionan Palacios *et al*. (2008), de los árboles nativos se utilizan distintas partes vegetativas, desde semillas, flores, hojas, hasta ramas en porcentajes que van de 10% a 40%. Sin embargo, la extracción de madera en donde se derriba todo el árbol se realiza en casi 50% en especies nativas, lo que ha traído como consecuencia el deterioro del recurso forestal.

El potencial de producción de bienes forestales es considerable, se utilizan cientos de productos (hojas, frutos, semillas, cortezas, gomas, ceras, fibras, colorantes, entre otros), obtenidos de entre 5000 a 7000 especies distribuidas en los diferentes ecosistemas del territorio nacional (Torres, 2004). La falta de datos estadísticos no permite saber el número exacto de productos que se utilizan ni el valor de la producción. Sin embargo, 20% de la población más marginada del país, que coincidentemente habita en las zonas rurales, depende para su subsistencia de los productos forestales obtenidos de los ecosistemas en los que viven (Torres, 2004).

En síntesis, existe un conjunto de especies maderables nativas ampliamente mencionadas tanto por la diversidad de usos que tienen, como porque son muy demandadas y porque se usan varias partes de la planta. A partir de estos datos, se sugiere que las especies de *Swietenia macrophylla, Cedrela odorata*, *Brosimum alicastrum, Cordia alliodora, Manilkara zapota*,*Terminalia obovata*, *Heliocarpus donnell-smithii*, *Croton guatemalensis, Bursera simaruba, Coccoloba cozumelensis* y *Cupania glabra* deben ser consideradas para ser utilizadas en programas de restauración, reforestación y plantación forestal. Dos especies que no fueron mencionadas por los habitantes de la comunidad de Emilio Rabasa son *Acacia pennatula* y *Pithecellobium arboreum*, sin embargo, éstas han sido utilizadas en otras regiones como especies forrajeras y cercos vivos. Incluso, hoy en día, a nivel mundial se realizan estudios sobre la contribución de *A. pennatula* en la productividad agroforestal sostenible (Nieto *et al*., 2001), por lo que podrían aprovecharse de igual forma dentro de la Rebiso.

Newton *et al*. (2009) menciona que la falta de información sobre los procesos ecológicos y características de las especies dificulta el manejo sostenible de los bosques. Por ello, es recomendable que para realizar un aprovechamiento adecuado de las especies forestales aquí cita-

das, deben realizarse antes estudios sobre germinación, crecimiento y el establecimiento de las especies, así como la evaluación del impacto del aprovechamiento, ya que los cambios en los esquemas de uso de la tierra y los usos y costumbres ligados a ello, pueden significar la pérdida de especies y de la diversidad genética, especialmente de la biota tropical que fueron seleccionadas en función de los ambientes y microhábitats y que hoy perduran en los ecosistemas tropicales (Nasi y Frost, 2009).

CONCLUSIONES

Las especies maderables nativas aprovechadas en la comunidad de Emilio Rabasa representan 6% de las especies arbóreas presentes en el área, 23% del total de las familias de Angiospermas encontradas para la Reserva de la Biosfera Selva El Ocote por Ochoa-Gaona (1996). Dichas especies representan una opción para ser utilizadas en forma integral de una manera económica y ecológicamente viable debido a que se presentan especies multipropósito que pueden ser manejadas en programas de reforestación, restauración y plantaciones, tal como lo sugieren Benítez *et al.* (2004).

De la lista de 35 especies encontradas en la comunidad de Emilio Rabasa, seis coinciden con las especies de mayor demanda a nivel nacional e internacional: *Cedrela odorata, Swietenia macrophylla, Cordia alliodora, Manilkara zapota, Brosimum alicastrum* y *Terminalia obovata* (Rivas, 2003; CATIE, 2006; Wightman *et al.*, 2006).

El presente trabajo muestra que el aprovechamiento del recurso forestal maderable nativo por parte de la comunidad sigue siendo vigente para necesidades básicas de la vida diaria, y que hay un conjunto de especies preferidas. El uso de leña y de postes son dos usos vigentes y, en amplios sectores, también la construcción, de tal modo que se requieren propuestas de reforestación que garanticen el abasto de madera. El uso de postes, impulsando las cercas vivas, puede traer asimismo beneficios ambientales. Sin embargo, es importante la realización de un estudio detallado sobre el impacto ambiental generado por la extracción forestal.

Las selvas tropicales, como la Selva El Ocote, representan un ecosistema único con gran biodiversidad y hábitat exclusivo de muchas plantas y animales en peligro de extinción y son considerados como principales fuentes de madera susceptibles de ser explotados por las comunidades locales (Smouts, 2003; Mittermeier *et al.*, 2003).

RECONOCIMIENTOS

A los habitantes de la comunidad de Emilio Rabasa por todo el apoyo proporcionado para llevar a cabo la investigación. A COCYTECH-UNICACH por la beca otorgada en la realización del Doctorado en Ciencias de Desarrollo Sustentable, a Fundación Produce Chiapas, A. C., por el financiamiento del proyecto “Identificar y establecer rodales con los mejores árboles semilleros”. A la doctora Tamara M. Rioja Paradela, doctor Rubén A. Moreno Moreno y doctor Eduardo R. Garrido Ramírez por la revisión y sugerencias al manuscrito.

REFERENCIAS

Benítez, G., M.T.P. Pulido-Salas y M. Equihua. 2004. Árboles multiusos nativos de Veracruz para reforestación, restauración y plantaciones. Instituto de Ecología, A.C., Sigolfo, Conafor, Xalapa, Veracruz, México. 288 p.

Breedlove, D.E. 1981. Flora of Chiapas, Part I: Introduction to the flora of Chiapas. The California Academy of Sciences, San Francisco, California, EUA. 35 p.

CATIE. 2006. Prácticas de recolección, manejo y uso de germoplasma de especies forestales nativas en América Central y sur de México. Proyecto SEEDSOURCE. Informe Final, Cartago, Costa Rica. 62 p.

CDMB. 2002. Programa Reforestar. Bucaramanga, CDMB (Corporación Autónoma

Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga), Subdirección de Planeación y Sistemas. 96 p.

Conabio. 2006. Capital natural y bienestar social. 1ª ed. Redacta, S.A de C.V., México. 71 p.

Dirzo, R. 2001. Tropical forests. *In*: F. S. Chapin III, O. E. Sala y E. Huber-Sannwald, eds. Global biodiversity in a changing environment. Scenarios for the 21st century. Ecological Studies 152. Springer. Nueva York. p: 251-276.

Francis, A.P. y D.J. Currie. 2003. A globally consistent richness climate relationship for angiosperms. The American Naturalist 161:523-536.

Flora mesoamericana. 2006. http://www.mobot.org/mobot/fm/

García, E. 1980. Modificación del sistema de clasificación climático de Köppen. Instituto de Geografía. UNAM. México. 246 p.

Geilfus, F. 1997. 80 herramientas para el desarrollo participativo: diagnóstico, planificación, monitoreo, evaluación. IICA-GTZ. San Salvador, El Salvador. 208 p.

Gentry, A. 1996. A field guide to the families and genera of woody plants of Northwest South America. Conservation International. University of Chicago Press, Chicago y Londres. 489 p.

Gligo, N. 1993. Medio ambiente y recursos naturales en el desarrollo Latinoamericano. CEPAL – PNUMA. Editorial Latinoamericana. 72 p.

Gómez-Pompa, A. y R. Dirzo. 1995. Reservas de la biosfera y otras áreas naturales protegidas de México. Instituto Nacional de Ecología, Semarnap y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 160 p.

González-Espinosa, M., J.M. Rey-Benayas, N. Ramírez-Marcial, M.A. Huston y D. Golicher. 2004. Tree diversity in the northern neotropics: regional patterns in highly diverse Chiapas, México. Ecography 27(6):741-756.

Lot, A y F. Chiang. 1986. Manual de herbario. Administración y manejo de colecciones, técnicas de recolección y preparación de ejemplares de herbario. Consejo Nacional de la Flora de México, A.C. México, D.F. 142 p.

Mardocheo, P., J. Romero y A. Velásquez. 2001. La cuenca de México: una revisión de su importancia biológica. Biodiversitas 37:12-15.

Martínez, M. 1979. Catálogo de nombres vulgares y científicos de plantas mexicanas. Fondo de Cultura Económica. México, D.F. 349 p.

Miranda, F. 1998. La Vegetación de Chiapas. Coneculta. 3ª ed. Talleres Gráficos del Estado de Chiapas. 205 p.

Miranda, F. 1952. La Selva de El Ocote. Publicaciones del Ateneo de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 56 p.

Mittermeier, R.A., N. Myers, J.B. Thomsen, G.A.B. Da Fonseca y S. Oliveiri. 2000. Biodiversity hotspots and major tropical wilderness areas: Approaches to setting conservation priorities. Conservation Biology 12:516-520.

Mittermeier, R.A., C.G. Mittermeier, T.M. Brooks, J.D. Pilgrim, W.R. Konstant, G.A.B. da Fonseca and C. Kormos. 2003. Wilderness and biodiversity conservation. Proceedings of the National Academy of sciences of the United States of America, PNAS 100(18):10309-10313.

Moreno, M.R.A. 2009. Comunidad campesina y apropiación social de los recursos naturales en la selva El Ocote. Tesis de doctorado, Instituto de Ciencias Sociales y Humanidades, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. 207 p.

Nasi, R. y P.G.H. Frost. 2009. Sustainable forest management in the tropics: is everything in order but the patient still dying? Ecology and Society 14(2):40. URL: http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art40/

Newton, A.C., L. Cayuela, C. Echeverría, J.J. Armesto, R.F. Del Castillo, D. Golicher, D. Geneletti, M. González-Espinosa, A. Huth, F. López-Barrera, L. Malizia, R. Manson, A. Premoli, N. Ramírez-Marcial, J. Rey Benayas, N. Rüger, C. Smith-Ramírez, y G. Williams-Linera. 2009. Toward integrated analysis of human impacts on forest biodiversity: lessons from Latin America. Ecology and Society 14(2):2. URL: http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art2/

Niembro, R.A. 1986. Árboles y arbustos útiles de México, naturales e introducidos. Limusa. Universidad Autónoma Chapingo. México. 43 p.

Nieto, H., E. Somarriba y M. Gómez. 2001. Contribución de *Acacia pennatula* (carbón) a la productividad agroforestal sostenible de la Reserva Natural Miraflor-Moropotente, Estelí, Nicaragua. Revista Agroforestería en las Américas 8(30):21-23.

Smouts, M.C. 2003. Tropical forests, international jungle. 1a ed. Palgrave Macmillan, EUA. 244 p.

Ochoa-Gaona, S. 1996. La vegetación de la Reserva El Ocote a lo largo del cañon del río La Venta. *In*: S.M.A Vásquez, e I. March M. eds. Conservación y desarrollo sustentable en la Selva El Ocote. 1ª ed. Conabio, Ecosfera, México. p: 45-86.

Palacios, M.Y., A.B. Rodríguez y O.A.M. Jiménez. 2008. Aprovechamiento de los recursos naturales por parte de la comunidad local en la cuenca media del río Atrato Chocó, Colombia. Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó; Investigación, Biodiversidad y Desarrollo 27(2):175-185.

Pennington, T.D. y J. Sarukhán. 2005. Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies. 3ª ed. Fondo de Cultura Económica, UNAM. México. 522 p.

Ricker, M. y D.C. Douglas. 1998. Botánica económica en bosques tropicales. Principios y métodos para su estudio y aprovechamiento. 1ª ed. Diana, México. 293 p.

Rivas, F. 2003. Especies forestales con potencial productivo en El Salvador. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Oficina de Políticas y Estrategias Unidad Ambiental Sectorial. 52 p.

Rzedowski, J. 1992. El endemismo en la flora fanerogámica mexicana: una

apreciación analítica preliminar. *In*: G. Halffter, eds. Diversidad biológica de Iberoamérica. Acta Zoológica Mexicana. 1ª ed. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Veracruz. México. p: 337-359.

Rzedowski, J. 1994. Vegetación de México. 6ª ed. Limusa, México D.F. 432 p.

Semarnat. 2000. Programa de manejo de la Reserva de la Biosfera Selva El Ocote. México, INE-Semarnat. 1ª ed. Impresos. México. 220 p.

Torres, R.J.M. 2004. Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020. FAO, Roma. 145 p.

Vásquez, S.M.A e I. March M. 1996. Conservación y desarrollo sustentable en la Selva El Ocote. 1ª ed. Conabio, Ecosfera. México. 475 p.

Vásquez-Sánchez, M. A. 1988. La Selva El Ocote. Monografía y plan de manejo para su conservación. Inireb. Xalapa, México. 70 p.

Vázquez, Y.C. y V. Cervantes. 1993. Estrategias para domesticación y propagación de árboles nativos de México. Ciencia y Desarrollo 19(113):52-58.

Vázquez, Y.C., M.A.I Bátis, S.M.I Alcócer, D.M. Gual y D.C. Sánchez. 1999. Árboles y arbustos nativos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Instituto de Ecología. UNAM. Conabio. México, D.F. 311 p.

Viana, V.M., A.J. Tabanez y L.F. Batista, J. 1997. Dynamics and restoration of forest fragments in the Brazilian Atlantic Moist Forest. *In:* W.F. Laurance y R.O. Bierregaard, eds. Tropical forest remnats. Ecology, management and conservation of fragmented communities. University of Chicago Press. Chicago. p: 351-365.

Villaseñor, J.L. y F.J. Espinosa-García. 2004. The alien flowering plant of México. Diversity and distributions 10(2):113-123.

Wightman, K.E, P. Cornelius J. y L.J. Ugarte. 2006. ¡Plantemos Madera! Manual sobre el establecimiento, manejo y aprovechamiento de plantaciones maderables para productores de la Amazonía peruana. World Agroforestry Centre (ICRAF) Technical Manual no. 4 World Agroforestry Centre – Amazon Regional Programme CIP-ICRAF, Lima, Perú. 195 p.

Witmore, T.C. 1997. Tropical forest disturbance, disappearance, and species loss. *In:* W.F. Laurance y R.O. Bierregaard, eds. Tropical forest remnats. Ecology, management and conservation of fragmented communities. University of Chicago Press. Chicago. p: 3-12.

Manuscrito recibido el 28 de mayo de 2010.
Aceptado el 9 de abril de 2013.

Este documento se debe citar como:
Orantes-García, C., M.A. Pérez-Farrera, C.U. Del Carpio-Penagos y C. Tejeda-Cruz. 2013. Aprovechamiento del recurso maderable tropical nativo en la comunidad de Emilio Rabasa, Reserva de la Biosfera Selva el Ocote, Chiapas, México. Madera y Bosques 19(3):7-21.







Convoca a los profesionistas interesados en las áreas de:

ecología manejo de recursos naturales

sistemática **conservación** y biodiversidad

a cursar:

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS

Estos programas están dirigidos principalmente a los egresados de las carreras de *biología, química, agronomía, ecología, veterinaria y otras afines.*

Nuestros programas pertenecen al Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC), lo que facilita que los estudiantes mexicanos y extranjeros obtengan una beca del CONACYT.

INFORMES
convocatoria@inecol.mx
www.inecol.mx/posgrado

Carretera antigua a Coatepec 351, El Haya, Xalapa, Veracruz, México 91070
Tel. 01 (228) 8 42 18 00 ext. 2003

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Respuesta de *Cedrela odorata* L. a diversos inoculantes micorrízicos procedentes de dos ecosistemas tropicales

Response of *Cedrela odorata* L. to several mycorrhizal inoculants from two tropical ecosystems

Heriberto Méndez-Cortés,[1*] José G. Marmolejo-Monsiváis,[2]
César Cantú-Ayala,[2] Víctor Olalde-Portugal,[3]
Eduardo Estrada-Castillón[2] y César Posadas-Leal[1]

RESUMEN

El presente estudio muestra el efecto de algunos inoculantes de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) sobre el desarrollo inicial de *Cedrela odorata* L.; para ello, se realizó un bioensayo con diferentes fuentes de inóculo procedentes de dos ecosistemas tropicales donde se distribuye esta especie en el estado de Veracruz. Se utilizaron cuatro tratamientos: T1, inoculación directa con un consorcio de esporas; T2, inoculación con raíces colonizadas de campo; T3, sin inoculación (testigo); T4, suelo nativo no estéril (T1, T2 y T3 en suelo nativo esterilizado). Las variables evaluadas fueron: biomasa seca aérea y radicular, altura, diámetro, número de foliolos, número de esporas y porcentaje de colonización. Los resultados mostraron diferencia estadística en las variables de crecimiento de los inoculantes provenientes de la selva mediana subperennifolia (SMS), donde T4 arrojó los mejores resultados, seguido por T2, mientras que T3 presentó los valores más bajos. Aunque los inoculantes de selva alta perennifolia (SAP) no mostraron diferencias estadísticas, su comportamiento fue similar a aquellos de la SMS. Lo anterior muestra la fuerte relación micorrízica entre los HMA y *C. odorata*; ante ello, se sugiere reproducir y utilizarlos en la producción de plántulas a fin de lograr una mejor adaptación al establecerlas en condiciones naturales.

PALABRAS CLAVE
Cedro rojo, crecimiento, glomeromycota, selva alta perennifolia, selva mediana subperennifolia.

ABSTRACT

This study shows the effect of some inoculants of the arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the initial development *Cedrela odorata* L; for this, a bioassay was conducted with different inoculum sources of two tropical forests where this species is distributed in Veracruz state. Four treatments were applied: T1, direct inoculation with a spore consortium; T2: inoculation with mycorrhizal roots from field; T3: without inoculation; T4: native soil not sterile. (T1, T2 and T3 in native sterilized soil). The analyzed variables were dry aerial and root biomass, height, diameter, leaflets number, spores number, and colonization percentage. Statistical analysis showed significant differences between inoculants from medium tropical forest (MTF), where T4 was the best results followed by T2, while T3 observed the lowest values. Although the inoculants of high tropical forest (HTF), do not have statistical significance, the results were similar to those in the MTF. These results showed a good micorrhizal relationship between these fungi and *C. odorata*; for

1 Facultad de Agronomía. UASLP. Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P.
2 Facultad de Ciencias Forestales. UANL. Linares, N.L.
3 Centro de Investigación y de Estudios Avanzado del IPN. Irapuato, Gto.
* Autor para correspondencia: C.e.: heriberto.mendez@uaslp.mx

this reason, it is recommended to reproduce this fungus to use in plants production in order to obtain plants best adapted to natural conditions.

KEY WORDS
Red cedar, growth, Glomeromycota, high tropical forest, medium tropical forest.

INTRODUCCIÓN

La alteración de ecosistemas debido a la deforestación sigue en muchas ocasiones un proceso de erosión muy acelerado, lo que ocasiona una baja productividad, menor calidad y cantidad de agua, así como una alteración en la diversidad biológica microbiana (Kennedy y Smith, 1995).

Cierta microbiota interactúa simbióticamente con la mayoría de las plantas, siendo operada por un consorcio o grupo de microorganismos capaces de transportar y suministrar los nutrimentos necesarios al interior de sus raíces (Fitter y Garbaye, 1994; Bonfante y Anca, 2009).

Una de las interacciones mutualistas más sobresalientes en la naturaleza, la forman los hongos micorrízicos arbúsculares (HMA) con las plantas, dada su capacidad de: *1)* facilitar la transferencia de fósforo y otros elementos importantes para el desarrollo celular (Dever *et al*., 2001; Cuenca *et al*., 2007); *2)* contribuir a la formación de la estructura del suelo (Piotrowski *et al.,* 2004); *3)* permitir una mayor tolerancia a periodos prolongados de estrés por sequía (Sieverding y Toro, 1998); *4)* actuar como antagonistas contra patógenos del suelo (Baath y Hayman, 1983); *5)* mantener la diversidad de plantas en los diferentes ecosistemas terrestres (Lovelock *et al*., 2003). Por las características anteriormente citadas, se considera a esta asociación parte primordial en los procesos de restauración en zonas altamente degradadas (White *et al*., 2008), como sucede en las selvas tropicales de México (Mas *et al*., 2003).

Se estima que 95% de las especies arbóreas que se distribuyen en estos ecosistemas presentan simbiosis con este tipo de hongos (LeTacon *et al*., 1998), los cuales son parte esencial para dar funcionalidad a sus hábitats naturales (Salas, 2004).

El cedro rojo (*C. odorata* L.) es una especie de importancia económica que se distribuye en la zonas tropicales de México, donde sus poblaciones naturales han sido seriamente afectadas por los impactos antropogénicos (Niembro, 1996). Ante ello, la Comisión Nacional Forestal (Conafor) en las últimas dos décadas ha implementado estrategias de reforestación y plantaciones forestales comerciales para mitigar a este tipo de problemas en estas zonas.

El manejo de los HMA, integrado a la producción de plántula en vivero, es indispensable para asegurar el éxito de adaptación de las repoblaciones bajo condiciones naturales (Allen *et al*., 2003); por tal motivo, es importante integrar paquetes tecnológicos de diferentes especies forestales de importancia económica que se encuentran distribuidas en los trópicos.

Los estudios de inoculación a *C. odorata* con HMA son escasos (Zulueta *et al*., 2000; Chable, 2007; Amador, 2010) y se han enfocado a utilizar cepas comerciales. Aunque se ha documentado la importancia de los HMA nativos en la producción de planta en vivero (Trejo *et al*., 2011); en México poco se conoce sobre este tema en árboles de importancia forestal.

OBJETIVO

Determinar el efecto de los inoculantes de HMA procedentes de dos ecosistemas tropicales del estado de Veracruz sobre el desarrollo inicial de *C. odorata*.

MATERIALES Y MÉTODO

Se muestrearon suelo y raíces en dos ecosistemas tropicales con vegetación primaria donde se distribuye *C. odorata* en el estado de Veracruz. Se seleccionaron nueve árboles por tipo de vegetación en los meses de mayo y junio. Según la carta de uso de suelo y vegetación serie III del INEGI, las cartas temáticas de precipitación, temperatura y elevación de la Conabio, así como la Conafor (2010), estos sitios presentan las siguientes características: el primer ecosistema corresponde a una selva alta perennifolia (SAP), con muestras provenientes del municipio de Tezonapa (18º36' N, 96º41' O), la altura sobre el nivel del mar (asmn) es de 180 m, se caracteriza por presentar climas tipo cálido húmedo, precipitación media anual de 2885 mm, temporada seca de tres meses como máximo, suelos profundos y alto contenido de materia orgánica. El segundo comprende una selva mediana subperennifolia (SMS) con muestras provenientes del municipio de Tantoyuca (21º22' N, 98º15' O), se caracteriza por presentar árboles con menor altura con respecto a la SAP, la asmn es de 100 m-120 m, clima cálido subhúmedo, precipitación de 1200 mm-1500 mm anuales, temporada de sequía muy prolongada y suelos menos profundos.

La evaluación de la respuesta de *C. odorata* a la aplicación de inoculantes micorrízicos nativos, se realizó mediante un bioensayo en invernadero del CINVESTAV-Unidad Irapuato, donde se utilizaron diferentes fuentes de inóculo procedentes de la SAP y SMS. Por cada ecosistema se establecieron cuatro tratamientos bajo un diseño completamente al azar: T1) suelo nativo estéril y 100 esporas tomadas al azar por ecosistema (se identificaron los géneros *Funneliformis, Glomus, Rhizophagus, Acaulospora, Diversispora* y *Pacispora* para SAP; y *Claroideoglomus, Funneliformis, Glomus, Rhizophagus, Sclerocystis, Paraglomus, Entrophospora, Scutellospora* y *Pacispora* para SMS con base en las características propuestas por Morton (1988) y Walker (1983)); T2) suelo nativo estéril y cinco gramos de raíces como fuente de inóculo por ecosistema (con presencia de micorriza superior a 60% previamente evaluada); T3) suelo nativo estéril por ecosistema (testigo); T4) suelo nativo sin esterilizar por ecosistema (con 8 esporas/g y 2 esporas/g de suelo previamente cuantificadas en SAP y SMS, respectivamente). Es importante señalar que los inoculantes del tratamiento 1 y 2 fueron aplicados directamente a la semilla en la siembra. El número de repeticiones integradas a cada tratamiento estuvo constituido por seis plantas.

La esterilización del suelo se realizó en autoclave por tres días a 103 kPa (15 psi) y 121 ºC, durante una hora. La semilla utilizada fue de árboles con adecuados aspectos fenotípicos (sanidad, altura, fuste limpio, etc.) provenientes del INIFAP (campo experimental El Palmar, Tezonapa, Veracruz). La siembra se realizó en bolsas de polietileno de 25 cm x 18 cm. Cada 15 días y durante cuatro meses y medio, se evaluó la altura total de la planta, diámetro al cuello de la base y número de foliolos, en donde se realizaron curvas de crecimiento con sus respectivos errores estándar. Al final, se determinó la biomasa seca aérea y biomasa seca radicular; relación peso seco aéreo/peso seco radicular; número de esporas (con base en el método de tamizado húmedo y decantación propuesto por Gerdemann y Nicolson (1963) y por el método de centrifugación en gradiente de sacarosa de acuerdo con Daniels y Skipper (1982)); porcentaje de colonización por hifas, vesículas y arbúsculos (con base en el método de tinción propuesto por Phillips y Hayman, 1970), mientras que la evaluación de colonización se realizó por el método de intersección propuesto por McGonigle *et al.* (1990). Para evaluar el comporta-

miento de estas últimas variables, se realizó un análisis de varianza ($p \leq 0{,}05$) para analizar el comportamiento de cada una de las fuentes de inóculo.

Los datos del número de esporas fueron transformados logarítmicamente (log x+1) debido a la gran variación, mientras que los datos porcentuales de colonización tuvieron una transformación angular o de Bliss por presentar distribución binomial; esto con el fin de cumplir con los supuestos del análisis de varianza, en el cual se requiere que respondan a una distribución normal como lo sugieren Steel y Torrie (1980).

RESULTADOS

Se encontraron diferencias en las variables de crecimiento, porcentaje de colonización y número de esporas tanto en la SAP como en la SMS (Figs. 1, 2, 3 y 4). El análisis de varianza arrojó únicamente diferencias estadísticas ($p \leq 0{,}05$) a la aplicación de inoculantes nativos procedentes de la SMS para todas las variables, excepto para el número de esporas (Tabla 1).

Los tratamientos que involucraron inoculantes nativos procedentes de la SMS, fueron los que mostraron los máximos valores en el desarrollo inicial de *C. odorata* (Figs. 1A, 1C, 1E, 2A y 2C). La mayor respuesta la aportó el tratamiento que involucró suelo nativo sin esterilizar (T4), seguido del tratamiento inoculado con raíces (T2). El tratamiento que se inoculó con 100 esporas aleatorias de este ecosistema (T1), promovió un escaso desarrollo pero siempre por arriba del tratamiento testigo (T3). La diferencia estadística entre los tratamientos la aportó el tratamiento testigo con respecto a aquellos que involucraron algún tipo de inoculante.

Aunque los tratamientos con inoculantes de la SAP no mostraron diferencias estadísticas en el análisis de varianza, se observó un comportamiento muy similar al reportado en la SMS en las variables de crecimiento (Figs. 1B, 1D, 1F, 2B y 2D).

La relación peso seco aéreo/peso seco radicular mostró una mayor biomasa en hojas y tallos con respecto a la biomasa radicular. El tratamiento que involucró suelo nativo sin esterilizar (T4), fue el que presentó una relación menor comparada con los otros tratamientos (Figs. 2E y 2F); esto es atribuido a la cantidad de biomasa radicular que estimuló los mayores desarrollos en las etapas tempranas de *C. odorata*.

La colonización de HMA al interior de la raíz, marcó una alta diferencia estadística entre los tratamientos de ambos suelos, especialmente por la cero inoculación en T3 (Tabla 1); sin embargo, cuando se compararon por separado a T1, T2 y T4, no se observaron diferencias estadísticas tanto en hifas, vesículas y arbúsculos. Los tratamientos que involucraron alguna fuente de inóculo fueron los que presentaron un mayor porcentaje de colonización por hifas con respecto a la colonización por vesículas y arbúsculos encontradas al interior de la raíz del cedro rojo. El porcentaje de colonización de vesículas fue el más bajo en los tratamientos empleados, mientras que los arbúsculos presentaron altos porcentajes de colonización, pero siempre por debajo de la colonización por hifas (Fig. 3).

La propagación del número de esporas, marcó una alta diferencia estadística entre los tratamientos de ambos suelos (Tabla 1), especialmente por la cero inoculación en T3; sin embargo, al igual que en los porcentajes de colonización, al comparar por separado T1, T2 y T4, no se encontraron diferencias estadísticas en ambos tratamientos. En la figura 4 se observa que el mayor número de esporas lo presentó el tratamiento de suelo nativo

Tabla 1. Análisis de varianza que muestra la respuesta en crecimiento de *Cedrela odorata*, la población de esporas y los porcentajes de colonización al utilizar diferentes fuentes de inóculo procedentes de dos ecosistemas tropicales (p≤0,05).

	Selva mediana subperennifolia		*Selva alta perennifolia*	
	F	*P*	*F*	*P*
Altura (m)	11,59	0,001***	1,76	0,212NS
Diámetro (cm)	8,98	0,002***	1,04	0,413NS
Número de foliolos	12,08	0,001***	0,95	0,451NS
Biomasa aérea (g)	8,26	0,003***	1,69	0,227NS
Biomasa raíz (g)	4,74	0,021**	1,36	0,306NS
Número de esporas/100 g de suelo	30,38	0,000***	80,82	0,000***
% de hifas	16,38	0,000***	11,25	0,001***
% de vesículas	3,89	0,037*	3,32	0,06NS
% de arbúsculos	14,89	0,000***	11,59	0,001***

*Significativo **Muy significativo ***Altamente significativo NS No significativo

sin esterilizar (T4), tanto en la SAP como en la SMS. Los tratamientos 1 y 2 no superaron las 200 esporas en 100 g de suelo; sin embargo, fueron suficientes para lograr un porcentaje de colonización entre 50% y 80% para estos factores de evaluación (Fig. 4).

DISCUSIÓN

Los HMA forman diferentes fuentes de inóculo que son indispensables para formar la nueva asociación micorrízica; estas fuentes pueden ser: esporas, hifas extraradicales y raíces colonizadas por hifas, vesículas y arbúsculos; sin embargo, no todos los hongos tienen la misma capacidad de formar estas asociaciones con las estructuras antes mencionadas (Klironomos y Hart, 2002). Esta característica se corroboró con los resultados de esta investigación, demostrando que ambas fuentes pueden tener diferente potencial para la producción de plántulas en vivero.

Generalmente, el uso más común que se le ha dado a estas fuentes de inóculo, ha sido para la propagación de especies micorrízicas en cultivos trampa (Bellgard, 1992). Básicamente, estas fuentes pueden ser útiles para replicar cepas nativas con alto potencial y que posteriormente pueden ser utilizadas en la producción de plántulas con fines de restauración o de plantación comercial.

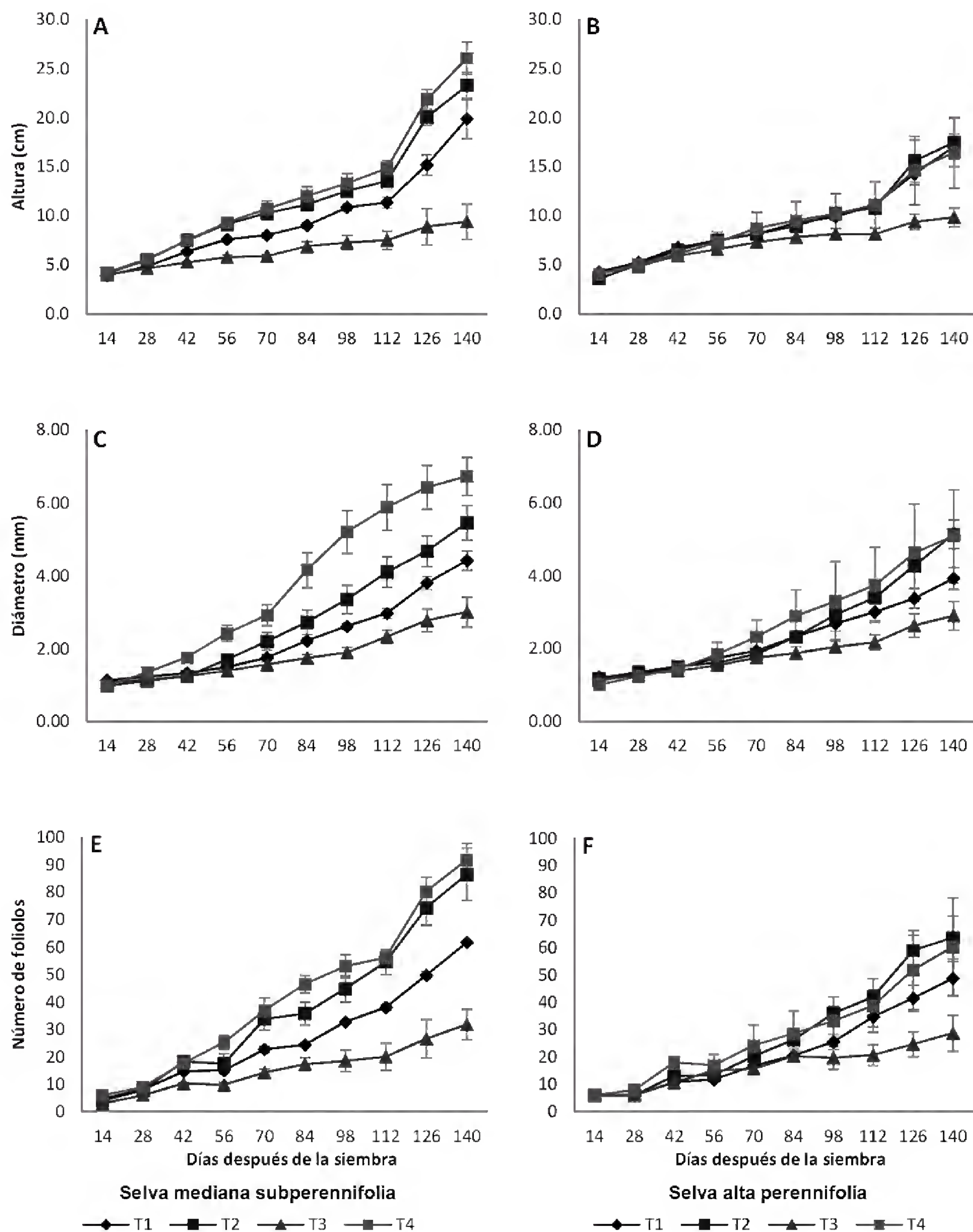


Figura 1. Crecimiento en altura, diámetro y número de foliolos de *C. odorata*, utilizando diferentes fuentes de inóculo procedentes de dos ecosistemas tropicales. Los datos graficados representan la media ± error estándar en los días posteriores a la siembra (n=48).

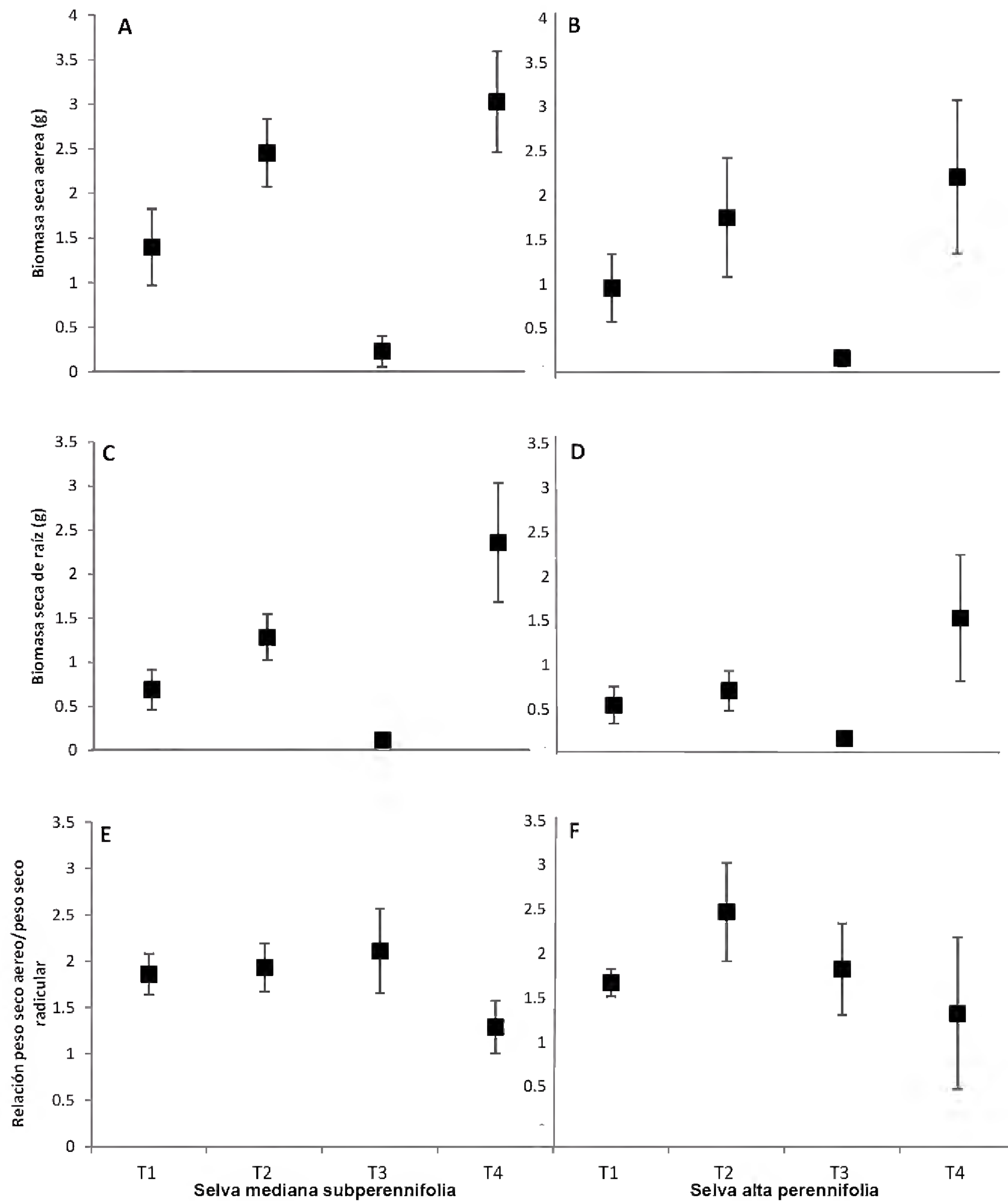


Figura 2. Crecimiento en biomasa seca de raíz y biomasa seca aérea de *C. odorata,* utilizando diferentes fuentes de inóculo procedentes de dos ecosistemas tropicales. Los datos graficados representan la media ± error estándar (n=48).

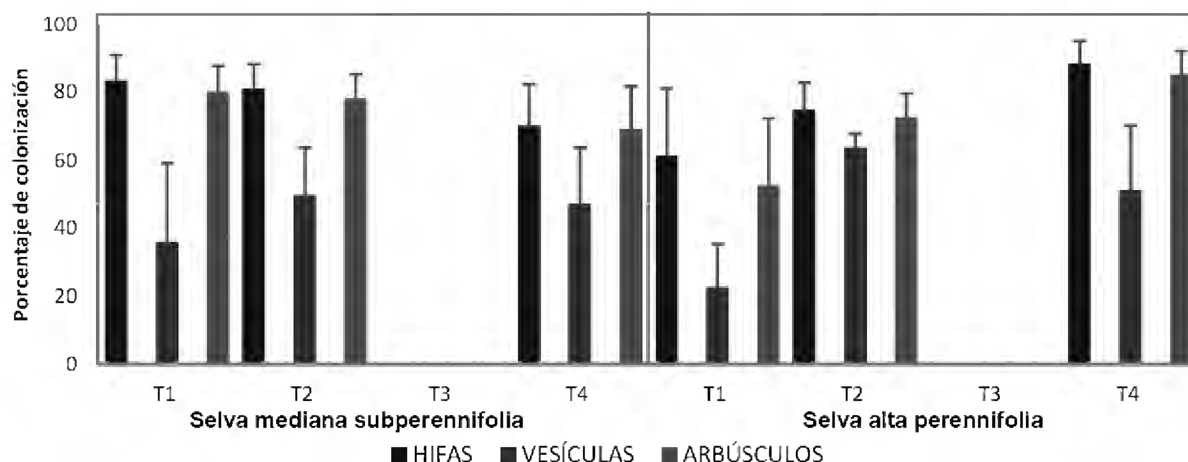


Figura 3. Porcentaje de colonización por hifas, vesículas y arbúsculos en *Cedrela odorata,* utilizando diferentes fuentes de inóculo procedentes de dos ecosistemas tropicales. Los datos graficados representan la media ± error estándar (n=48).

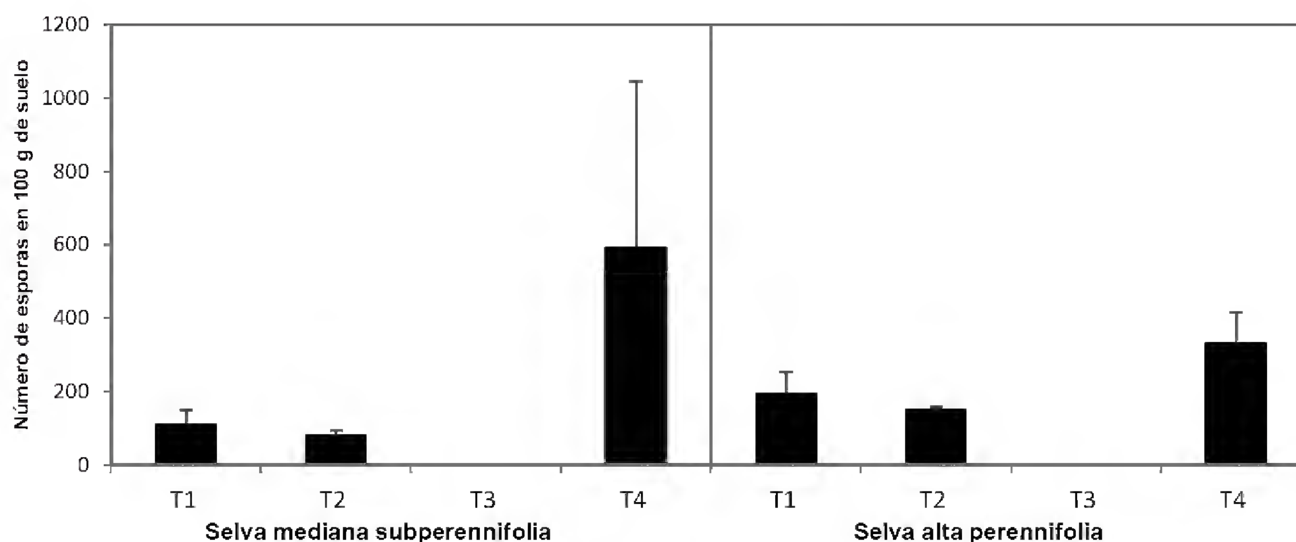


Figura 4. Número de esporas presentes en *Cedrela odorata,* utilizando diferentes fuentes de inóculo procedentes de dos ecosistemas tropicales. Los datos graficados representan la media ± error estándar (n=48).

Los resultados de este bioensayo demostraron que las mayores tasas de crecimiento inicial en *C. odorata* se observaron cuando interactuaron simbióticamente con cualquier fuente de inóculo de estos HMA. Los tratamientos que involucran suelo nativo estéril o ausencia de fuentes de inóculo, fueron los que desarrollaron una menor tasa de crecimiento; por ende, se concluye que la interacción planta-micorriza es esencial para lograr un mayor crecimiento en esta especie maderable, tal y como lo documentó Amador (2010) al inocular este tipo de plantas con propágulos de *Rhizophagus intraradices* (antes *Glomus intraradices*).

Aún con la interacción planta-micorriza, se observó que las plántulas son capaces de responder de manera diferente cuando se utiliza uno u otro tipo de inóculo. Esta diferencia es atribuida a la capacidad que tienen ciertos inoculantes del suelo para lograr una pronta coloniza-

ción en un tiempo más corto. Lo anterior fue documentado por Bellgard (1992), quien encontró que los fragmentos de raíces estimulan una rápida inoculación con respecto a las esporas o ciertos fragmentos hifales, lo cual puede traducirse en un mayor crecimiento inicial de las plántulas establecidas en vivero.

En general, se observó un mayor efecto en el crecimiento de *C. odorata* cuando se utilizó suelo nativo no esterilizado; esto se le atribuye a la gran variedad de fuentes de inóculo (esporas, vesículas, arbúsculos, hifas extra e intraradicales) que desarrollan naturalmente los ecosistemas tropicales, lo que le confiere una rápida colonización de acuerdo con lo comentado anteriormente.

Los porcentajes de colonización al final de la evaluación no tuvieron relación entre las diferentes fuentes de inóculo. Esta situación es atribuida a la pronta colonización que se da en las etapas tempranas de la planta, la cual aumenta conforme van desarrollando las nuevas raíces. Es por esta razón que los porcentajes observados en estos tratamientos mostraron un comportamiento muy similar entre uno y otro al final del bioensayo.

La producción de esporas por gramo de suelo no tiene relación con los porcentajes de colonización, lo cual puede estar asociado en mayor medida a la especie o especies micorrízicas que interactuaron durante el bioensayo; sin embargo, la baja producción de estas esporas deberá ser analizada una vez que se determine la efectividad o no efectividad relacionada con cada una de las especies en estudios de asociación.

Por último, los HMA desempeñan un papel importante en la sucesión ecológica (White *et al*., 2008); por ello, el uso de inoculantes nativos es ideal para fomentar la interacción entre estos hongos y *C. odorata*. Además, estas fuentes pueden ser utilizadas en el futuro para la producción de plántulas con fines de reforestación o plantaciones forestales comerciales en áreas deforestadas del trópico mexicano, lo que puede propiciar una pronta recuperación de estas áreas y, por ende, una mayor adaptación, tal y como lo sugiere Allen *et al*. (2003) en sus resultados con algunas especies tropicales.

CONCLUSIONES

El uso de cepas nativas de HMA procedentes de ambientes naturales, estimulan un mayor desarrollo inicial en *C. odorata*; además, su implantación en zonas altamente degradadas podría establecer una mayor adaptación como lo han sugerido otros autores; por ello, se recomienda propagar a estas cepas para generar paquetes tecnológicos viables en la producción de plántulas en vivero o invernadero.

Las raíces colonizadas son una de las fuentes de inóculo poco utilizadas en estudios de asociación; sin embargo, pueden ser útiles para propagar especies micorrízicas asociadas directamente de sus áreas naturales de distribución.

El uso de suelo nativo procedente directamente de las áreas naturales de distribución, en combinación con otros sustratos utilizados en vivero o invernadero, podría servir como fuente de inóculo para la asociación simbiótica entre los hongos nativos y las plantas de interés comercial.

Las fuentes de inóculo provenientes de la SMS estimularon un mayor desarrollo inicial en plántulas de *C. odorata*, lo cual explica la función que cumplen los HMA en el mantenimiento de ecosistemas que aparentan tener un mayor estrés ante la sequía.

Es necesario replicar las especies de HMA que se asociaron durante el bioensayo en cada uno de los ecosistemas tropicales. Posteriormente, se recomienda realizar pruebas de efectividad y no efectividad individual y en consorcio para la producción de plántulas de *C. odorata.* Esta situación permitirá obtener cepas con alto potencial para la inoculación de esta especie maderable y que posteriormente serán útiles para el desarrollo de paquetes tecnológicos.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Laboratorio de Investigaciones y Diagnóstico Fitosanitario por los apoyos económicos otorgados para realizar la presente investigación.

REFERENCIAS

Allen, B.E., M.F. Allen., L. Egerton-Warburton., L. Corkidi y A. Gómez-Pompa. 2003. Impacts of early –and late– seral mycorrhizae during restoration in seasonal tropical forest, Mexico. Ecological Application 13:1701-1717.

Amador, A.L. 2010. Evaluación de tres métodos de inoculación con micorriza en el desarrollo de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en contenedor. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico Superior de Zongolica, Veracruz, México. 91 p.

Baath, E. y D.S. Hayman. 1983. Plant growth response to vesicular-arbuscular mycorrhiza: XIV. Interactions with *Verticillium* wilt on tomato plants. New Phytologist 95:419-426.

Bellgard, S.R. 1992. The propagules of vesicular-arbuscular mycorrhizal (VAM) fungi capable of initiating VAM infection after topsoil disturbance. Mycorrhiza 1:147-152.

Bonfante, P e I.A. Anca. 2009. Plants, mycorrhizal fungi, and bacteria: a network of interactions. Annual Review Microbiology 63:363-383.

Chable, C.C. 2007. Inoculación micorrízica arbuscular y uso de vermicomposta en la producción de plantas de Cedro (*Cedrela odorata* L.) en vivero. Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados. San Francisco de Campeche, Campeche. México. 79 p.

Conafor (Comisión Nacional Forestal). 2010. Sistema Nacional de Información Forestal. Tipos de vegetación forestal y de suelo. www.conafor.gob.mx

Cuenca, G., A. Cáceres., G. Oirdobro., Z. Hasmy y C. Urdaneta. 2007. Arbuscular mycorrhizae as an alternative for a sustainable agriculture in tropical areas. Interciencia 32:23-29.

Daniels, H.B.A. y H.D. Skipper 1982. Methods for the recovery and quantitative estimation of propagules from soil. *In*: N.C. Schenck, ed. Methods and principles of mycorrhiza research. American Society for Phytopathology. St Paul, Minn. p:29-37.

Dever, J.D., P.A. Schultz., A. Pringle y J.B. Morton. 2001. Arbuscular mycorrhizal fungi: more diverse than meets the eye, and the ecological tale of why. BioScience 51:923-931.

Fitter, A.H. y J. Garbaye. 1994. Interactions between mycorrhizal fungi and other soil organisms. Plant and Soil 159:123-133.

Gerdeman, J.W. y T.J. Nicolson. 1963. Spores of Mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. Transaction of the British Mycological Society 46: 35-44.

Kennedy, A.C. y K.L. Smith. 1995. Soil microbial, diversity and the sustainability of agricultural soils. Plant Soil 170:75-86.

Klironomos, J.N. y M.M. Hart. 2002. Colonization of roots by arbuscular mycorrhizal fungi using different sources of inoculum. Mycorrhiza 12:181-184.

LeTacon, F., J. Garbaye y G. Carr. 1998. The use of micorrizas in temperate and tropical forest. Simbiosis 3: 179-206.

Lovelock, C.E., K. Andersen y J.B. Morton. 2003 Arbuscular mycorrhizal communities in tropical forests are affected by host tree species and environment. Oecologia 135:268-279.

McGonigle, T.P., M.H. Miller, D.G. Evans, G.L. Fairchild y J. A. Swan. 1990. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. New Phytologist 115:495-501.

Mas, J.F., A. Velázquez, J.R. Días, R. Mayorga, C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, A. Pérez y G. Bocco. 2003. Assessing land use/cover changes in México: a wall-to-wall multidate GIS database. Geoscience and Remote Sensing Symposium 5:3359-3361.

Morton, J.B. 1988. Taxonomy of VA mycorrhizal fungi: classification, nomenclature, and identification. Mycotaxon 37:267-324.

Niembro, R.A. 1996. Producción de semillas de cedro *Cedrela odorata* L. bajo condiciones naturales en Campeche, México. INIFAP. p: 215-228.

Phillips J.M. y D.S. Hayman. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions* of the *British* Mycological *Society* 55:158-161.

Piotrowski, J.S., T. Denich, J.N. Klironomos, J.M. Graham y M.C. Rillig. 2004. The effects of arbuscular mycorrhizas on soil aggregation depend on the interaction between plant and fungal species. New Phytologist 164:365-373.

Salas, E. 2004. Las micorrizas y su importancia para el manejo y conservación de los árboles del trópico. Memoria del I Congreso Sobre Suelos Forestales y de Ordenación Territorial ¿Son los Suelos Forestales Diferentes? Universidad Nacional-INISEFOR. Heredia, Costa Rica.

Sieverding, E. y T.S. Toro. 1998. Influence of soil water on VA Mycorrhiza V. Performance of different VAM fungal species with Cassava. Agronomy & Crop Science 161:322-333.

Steel, R.G.D. y J.H. Torrie. 1980. Principles and procedures of statistics. 2a. ed. McGraw-Hill Inc. 633 p.

Trejo, D., R. Ferrera-Cerrato, R. García, L. Varela, L. Lara y A. Alarcón. 2011. Efectividad de siete consorcios nativos de hongos micorrízicos arbusculares en plantas de café en condiciones de invernadero y campo. Revista Chilena de Historia Natural 84:23-31.

Walker, C. 1983. Taxonomic concepts in the *Endogonaceae*: spore wall characteristics in species descriptions. Mycotaxon 18:443-455.

White, J.A., J. Tallaksen e I. Charvat. 2008. The effects of arbuscular mycorrhizal fungal inoculation at a roadside prairie restoration site. Mycologia 100:6-11.

Zulueta, R., M. Alejandro, M. Escalona, D. Trejo y L. Lara. 2000. Respuesta de dos especies forestales tropicales a la inoculación micorrízica. *In*: A. Alarcón y R. Ferrera-Cerrato, eds. Ecología, fisiología y biotecnología de la micorriza arbuscular. Mundiprensa, México. p: 184-193.

Manuscrito recibido el 17 de junio de 2011.
Aceptado el 25 de abril de 2013.

Este documento se debe citar como:
Méndez-Cortés, H., J.G. Marmolejo-Monsiváis, C. Cantú-Ayala, V. Olalde-Portugal, E. Estrada-Castillón y C. Posadas-Leal. 2013. Respuesta de *Cedrela odorata* L. a diversos inoculantes micorrízicos procedentes de dos ecosistemas tropicales. Madera y Bosques 19(3):23-34.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Influencia de variables físicas en la productividad de *Pinus arizonica* y *Pinus engelmannii* en el sur de Chihuahua, México

Influence of physical variables in the yield of *Pinus arizonica* and *Pinus engelmannii* in the south of Chihuahua, México

Martín Martínez-Salvador,[1*] Ricardo David Valdez-Cepeda[2] y Marín Pompa García[3]

RESUMEN

Se utilizó el índice de sitio (IS) para identificar la influencia de variables de suelo, clima y relieve sobre el crecimiento de *P. arizonica* y *P. engelmannii* en el sur de Chihuahua. Los modelos de IS fueron desarrollados a partir de información de análisis troncales usando la función de Schumacher y el método de curva guía. Adicionalmente, se desarrolló un muestreo sistemático usando parcelas de 400 m^2, donde se midieron altura y edad de árboles dominantes, así como variables de suelo, clima y relieve. Con los modelos de IS se identificó la calidad de estación de cada parcela muestreada. Se realizó un análisis de discriminante canónico (ADC), para identificar diferencias multivariadas entre calidades de estación, y un análisis de varianza, para identificar la influencia de las variables físicas en el crecimiento de las especies. El método de curva guía predijo con precisión el crecimiento de ambas especies (Pseudo $R^2 > 0,90$). El ADC mostró que existen diferencias multivariadas entre las calidades de estación, con alta influencia de la pendiente, disección vertical, profundidad de suelo y temperaturas. De acuerdo con el análisis de varianza ($\alpha \leq 0,05$), los valores para las variables de mayor influencia sobre la mejor calidad de estación fueron la profundidad de suelo > 43 cm, pendiente menor a 12° ± 8°, temperatura mínima promedio menor a 8 °C ± 3 °C y temperatura máxima promedio menor a 18 °C ± 3 °C. Estos valores pueden ser de gran utilidad para construir modelos espaciales de productividad en los estados de Chihuahua y Durango, México.

PALABRAS CLAVE
Calidad de estación, crecimiento, índice de sitio, variables físicas.

ABSTRACT

In the south of Chihuahua Mexico, site index (IS) models were used in order to identify the influence of soil, climate and topography variables on *P. arizonica* and *P engelmannii* growth. The IS models were fitted by using the Schumacher equation and the guide curve with information from stems analysis. Additionally a systematic sampling method was carried out on 400 m^2 field plots. Dominant tree height and age, and physical variables of the sites were measured. Site index models were adjusted with tree height and age data for both species. With site index models the productivity of each sampled plot was identified. An analysis of canonical discriminate was carried on in order to identify multivariate differences in the productivity levels, and an analysis of variance was conducted to detect differences per each variable studied. Site index models accuracy were statistically significant with a pseudo $r^2 > 0,9$. The ADC showed differences in the levels of productivity, where slope, vertical dissection, soil deep and temperatures were the most important variables. According to the analysis of variance ($\alpha \leq 0,05$), the

1 INIFAP. Km. 33.3 carretera Chihuahua-Ojinaga, 32910, Ciudad Aldama, Chihuahua, México.
2 Centro Regional Universitario Centro-Norte. Universidad Autónoma Chapingo, El Orito, Zacatecas, México.
3 Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, Dgo., México.
* Autor para correspondencia. C.e.: martinez.martin@inifap.gob.mx

values for places whit highest productivity, and those variables which have more influence over the growth of both species are: soil depth > 43 cm, slope lower than 12° ± 8°, average of minimum temperature of 8 °C ± 3 °C, maximum temperatures < 18 °C ± 3 °C. These values could be highly useful to build spatial models of productivity in the northwest of Mexican forest.

KEYWORDS
Station quality, growth, site index, physical variables.

INTRODUCCIÓN

En los bosques de la Sierra Tarahumara del sur de Chihuahua, México, crecen poblaciones nativas de *Pinus arizonica y Pinus engelmannii*, las cuales son aprovechadas para la extracción de madera. El manejo sustentable de los bosques requiere del conocimiento de los factores ambientales que determinan el crecimiento de las especies forestales (Palahí *et al.,* 2004). La influencia de estos factores sobre la producción y productividad del bosque generalmente se evalúa a través de la construcción de modelos de índice de sitio, como una medida indirecta de la calidad de estación (Madrigal, 2002); sin embargo, en pocas ocasiones se evalúa la influencia directa de las variables físicas sobre el crecimiento del arbolado (Heiberg y White, 1956; Martínez *et al.,* 2006).

La calidad de estación se refiere a la capacidad inherente de un territorio para hacer crecer los árboles que sostiene y usualmente se utilizan modelos que relacionan edad-altura de árboles dominantes para calificarla. Estos modelos son conocidos como índice de sitio (Clutter *et al.,* 1983), los cuales están determinados por la suma de los factores como suelo, topografía, clima y factores bióticos, que interrelacionados afectan la productividad de un bosque (Spurr, 1952; Spurr y Barnes, 1982; Clutter *et al.,* 1983; Daniel *et al.,* 1982; Musalem *et al.,* 1986; Pritchett, 1986; Deo, 2013).

En trabajos realizados en México se describen las relaciones entre la altitud y la distribución de especies de pino (Eguiluz, 1977; Eguiluz, 1982; Madrigal, 2002) y recientemente se han desarrollado modelos bioclimáticos para reconocer patrones de distribución potencial de especies de pinaceas y para la cuantificación de características climáticas donde las especies prosperan o podrían desarrollarse con mayor productividad (Téllez *et al.,* 2004; Peters *et al.*, 2013).

Existe un creciente interés por conocer la influencia de variables físicas sobre el crecimiento de especies y productividad de los bosques (Martínez, 2008; Medlyn *et al.*, 2011), ya que el conocimiento de esta información es importante para generar cartografía de potencial productivo de diferentes áreas mediante el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Martínez *et al.,* 2006; Latta *et al.*, 2009).

Estudios ecológicos muestran que se han encontrado relaciones entre el crecimiento de coníferas y la profundidad de suelo, altitud, pendiente y exposición (Castaños, 1962; Griffiths *et al.*, 2009). Otros trabajos mencionan que las propiedades físicas que más influyen en el crecimiento de algunas coníferas son pH, material muerto y contenido de limo en la capa de 50 cm de suelo (Rodríguez, 1982; Stoler y Relyea, 2011). Estos antecedentes pueden ser usados para construir modelos espaciales a partir de valores de óptimas condiciones para el desarrollo de las especies (Sánchez y Chacón, 1986; Martínez*,* 2008).

Con la finalidad de caracterizar la influencia de variables físicas de los factores de clima, suelo y relieve en los bosques del sur de Chihuahua, México, se

clasificaron sitios con diferente productividad (alta, media y baja), usando modelos de índice de sitio. Los resultados son de gran utilidad para generar y validar cartografía de los bosques en el norte de México y para implantar mejores prácticas de manejo en los predios en los que se realiza cosecha de madera.

MATERIALES Y MÉTODO

El estudio se realizó en los bosques del municipio de Guadalupe y Calvo, en la Sierra Tarahumara del sur de Chihuahua, México en los años 2006 y 2007 (Fig. 1).

El municipio de Guadalupe y Calvo se encuentra entre los 26º41' y 25º34' de latitud norte y 106º25' y 107º42' de longitud oeste, tiene una superficie aproximada de 904 000 hectáreas. El clima que predomina en el municipio es templado subhúmedo con lluvias en verano (García, 1981). Los principales suelos del municipio son litosol, regosol, xerosol, feozem, cambisol y planosol (CETENAL, 1972); los cuales, se caracterizan por ser muy delgados y con alto porcentaje de pedregosidad. Los tipos de vegetación de la región son bosques templados, selva baja caducifolia, pastizales y matorrales (Rzedowsky, 1978). La principal actividad productiva en el municipio es la silvicultura con una cosecha anual de aproximadamente 300 000 m^3 de madera en rollo, lo cual representa 25% de la madera que se produce en el estado y 3,7% de la producción nacional.

Para el ajuste de modelos de índice de sitios se realizaron análisis troncales a un grupo de 40 árboles dominantes de *P. arizonica* y 42 de *P. engelmannii* siguiendo



Figura 1. Área de estudio.

las metodologías propuestas por Mas (1970) y el FPC (1998); las cuales consisten en examinar secciones transversales del fuste, seleccionadas a 30 cm, 1,30 m y cada 2 m hasta alcanzar 10 cm de diámetro, con medición de la punta. Las secciones transversales fueron analizadas mediante el conteo y medición de anillos para integrar la base de datos con información de edad, diámetro y altura para el posterior análisis mediante procedimientos de regresión no lineal.

Para calificar la calidad de estación en los bosques del municipio se muestrearon 220 sitios circulares de 400 m^2 distribuidos en un diseño sistemático de 5 km entre sitios. En cada sitio se anotaron los datos de ubicación geográfica y la altura sobre el nivel medio del mar, y se tomó información de altura y edad de tres árboles dominantes de las especies *P. arizonica y P. engelmannii*. Además se midieron variables físicas de los factores suelo, relieve y clima.

Para el caso del suelo se midieron la profundidad de suelo (cm), pedregosidad (%), suelo desnudo (%), grosor de la capa de mantillo (grosor de mantillo) (cm), grosor de la capa de hojarasca (grosor de hojarasca) en centímetros. Para el relieve se midieron la pendiente (°), exposición (Azimut), disección horizontal (densidad de arroyos por kilómetro cuadrado) y disección vertical (diferencia en altura sobre el nivel del mar en m/km^2), las dos últimas variables se derivaron del análisis del Modelo Digital de Elevación esc 1:50 000.

Finalmente, se obtuvieron datos de variables de clima como la temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación. Las variables de clima se generaron mediante modelos de interpolación en SIG con información de estaciones meteorológicas ubicadas en la región de influencia del área de estudio que comprende los estados de Durango, Chihuahua, Sonora y Sinaloa (IMTA, 2006).

Análisis de la información

Con la información de altura y edad proveniente de los análisis troncales se ajustaron funciones de índice de sitio para las especies *Pinus arizonica* y *Pinus engelmannii* utilizando el modelo de Schumacher con el método de curva guía.

Modelo Schumacher

$$H = \beta_0 e^{-\beta_1 E}$$

donde:

H = Altura dominante (m)
E = Edad (años)
β_0 = Parámetros de los modelos

Cada sitio de muestreo fue calificado de acuerdo con su calidad de estación utilizando la información de edad y altura de los árboles dominantes de las parcelas de muestreo y los modelos de índice de sitio ajustados para ambas especies.

Se establecieron tres niveles de productividad (calidad de estación) I. Alta, II. Media y III. Baja, y posteriormente se realizó un análisis de discriminante canónico (ADC) para detectar diferencias multivariadas entre las tres calidades de estación a partir de la base de datos de variables físicas.

Se consideró el método de la distancia cuadrada *Mahalanobis* y la prueba de Lamda Wilks como estadísticos de prueba para la toma de decisiones sobre las funciones de discriminante canónico (FDC) (Hair *et al.*, 1998).

Una vez identificadas diferencias multivariadas entre calidades de estación,

y posterior a una estandarización de la base de datos, se realizó un análisis de varianza para identificar diferencias a nivel de variables individuales, con especial atención en las variables que definieron las funciones de discriminante canónico (FDC). Finalmente, se realizó una comparación de medias usando el procedimiento de Tukey con un valor de significancia de 0,05.

Para el análisis de varianza se usó un modelo completamente aleatorio.

$$Y_i = M + T_i + X_j$$

donde:

Y_i = variable resultado del modelo
M_i = media generalizada
T_i = efecto de tratamiento (calidad de estación)
X_{ikj} = error experimental.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los modelos de índice de sitio para *P. arizonica*, *y P. engelmannii* fueron estadísticamente aceptables (Tabla 1) y altamente predictivos con una pseudo R^2 de 0,98 para *P. arizonica* y 0,92 para *P. engelmannii*. Estos modelos permitieron clasificar la base de datos de sitios de muestreo en función de tres calidades de estación (niveles de productividad) (Figs. 2 y 3). Los valores observados que se muestran en las figuras 2 y 3 corresponden a las alturas de los árboles dominantes medidos en campo en los sitios de muestreo, mientras que las curvas corresponden a los modelos de IS ajustados con el modelo de Shumacher, usando el método de curva guía a partir de pares de datos edad-altura de los análisis troncales.

Estos modelos son útiles para predecir el crecimiento de los árboles en el futuro y de esta manera realizar adecuadamente la planificación del manejo, proyecciones del inventario y determinación del potencial de cosecha (Clutter *et al.*, 1983; Palahí *et al.,* 2004; Martínez *et al.*, 2007); sin embargo, con estos modelos es importante construir cartografía, la cual permitirá integrar con mayor facilidad el índice de sitio a la planeación y manejo de bosques, por lo que es necesario conocer la influencia de las variables ecológicas como suelo, pendiente y relieve sobre el crecimiento de las especies (Spurr y Barnes,1982; Martínez, 2008).

Una de las pruebas que resultan de gran utilidad para identificar diferencias en la influencia de variables o grupos de variables sobre las diferentes condiciones

Tabla 1. Modelos de Schumacher de índice de sitio ajustados por el método de curva guía.

Model	*Estimadores*		*Int. Confid* β_1		*Pseudo* R^2	*Pr > F*
	β_0	β_1	*Inf.*	*Sup.*		
Pinus arizonica	26,98	30,96	20,40	41,53	0,98	0,0001
Pinus engelmannii	26,52	34,44	22,03	46,84	0,92	0,0001

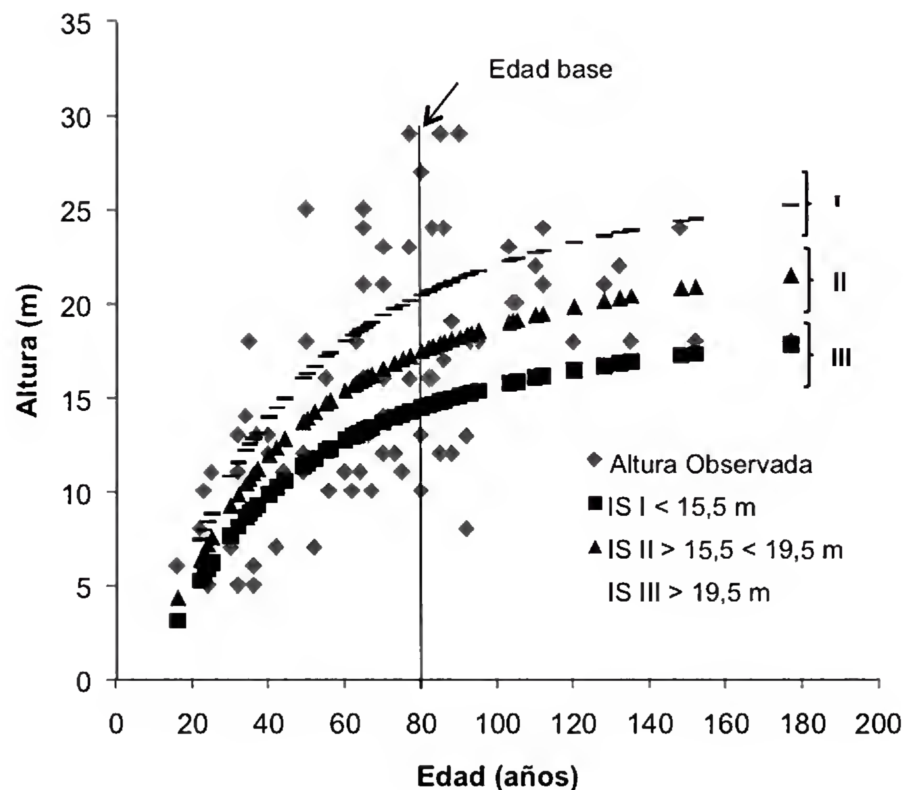


Figura 2. Modelo de Schumacher con el método de curva guía en Índice de Sitio de *Pinus arizonica* Engelm., en Guadalupe y Calvo, Chihuahua, México.

Se analizó el crecimiento de los árboles y se estableció la clasificación de las curvas de índice de sitio (IS) a una edad base de 80 años. En función de la edad base el IS < 15,5 m representa la curva de los sitios de productividad baja que agrupa a los árboles que alcanzan una altura de 15,5 m, el IS > 15,5 < 19,5, representa la curva de los sitios de productividad media que agrupa a los árboles que alcanzan alturas entre 15,5 m y 19,5 m y el IS > 19,5 m, representa la curva de los sitios de productividad alta que agrupa a los árboles que alcanzan alturas superiores a los 19,5 m.

de un sistema es el análisis de determinante canónico (ADC). En este estudio al realizar el ADC, la distancia cuadrada de Mahalanobis indicó que las calidades de estación son diferentes entre sí (P < 0,05). Por su parte, la prueba de Lambda Wilks también mostró diferencias multivariadas entre las tres calidades de estación (P < 0,05).

La correlación canónica y el vector raíz indicaron que la primer correlación canónica fue mayor que la segunda (P < 0,05) con un coeficiente de correlación R = 0,50, y un valor del vector raíz de 0,60, mientras que el porcentaje de la variación explicada con la primer función discriminante fue de 0,83.

La estructura canónica total (Tabla 2) muestra que las variables pedregosidad, pendiente, disección vertical y exposición están negativamente relacionadas con la primera variable canónica, mientras que las variables altura sobre el nivel del mar (asnm), profundidad de suelo, temperatura máxima y mínima, mantillo y precipitación, están relacionadas positivamente. La primer función de discriminante canónico muestra que la separación entre niveles de productividad está dada por la disección vertical (R = 0,60), precipitación (R = 0,48), profundidad de suelo (R = 0,43) y la pendiente (R = 0,28).

El análisis de discriminante canónico indica que las calidades de estación son

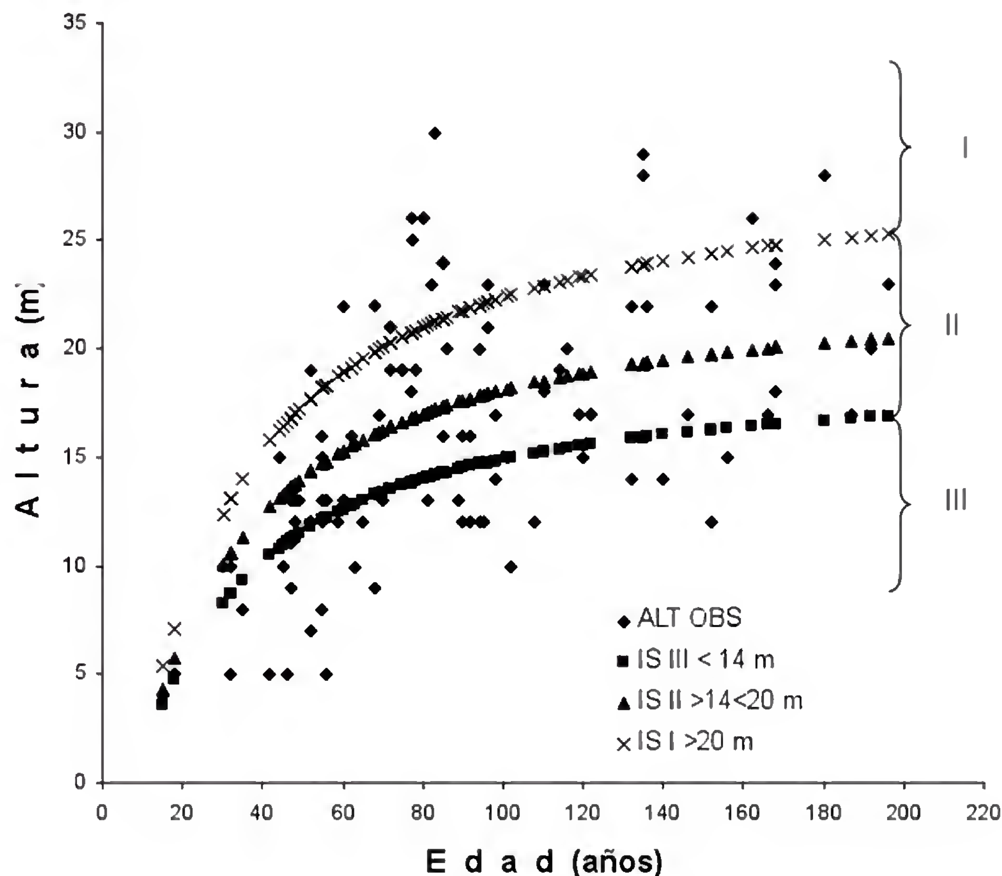


Figura 3. Modelo de Schumacher con el método de curva guía en Índice de Sitio de *Pinus engelmannii* en Guadalupe y Calvo, Chihuahua, México.

Se analizó el crecimiento de los árboles, y se estableció la clasificación de las curvas de índice de sitio (IS) a una edad base de 80 años. En función de la edad base el IS<14 m, representa la curva de los sitios de productividad baja que agrupa a los árboles que alcanzan una altura de 14 m, el IS>14 < 20 representa la curva de los sitios de productividad media que agrupa a los árboles que alcanzan alturas entre 14 m y 20 m y el IS>20 m, representa la curva de los sitios de productividad alta que agrupa a los árboles que alcanzan alturas superiores a los 20 m.

multivariadamente distintas (P < 0,005), considerando la primer función canónica (Fig. 4). Por su parte, la figura 5 muestra gráficamente estas diferencias entre las tres calidades de estación.

Con base en el DCA se observa mayor influencia de las variables topográficas y climáticas sobre la productividad. Al respecto, estudios recientes muestran que las características climáticas influyen considerablemente sobre la productividad del bosque, donde las temperaturas juegan un papel importante en la generación de microambientes que aceleran la descomposición del material orgánico y la consecuente liberación de nutrientes; mientras que las relaciones entre la precipitación y las densidades de arbolado incrementan la disponibilidad de humedad en bosques secos (Deo, 2013; Raz-Yaseef *et al.*, 2010; Karhu *et al.*, 2010; Latta *et al.*, 2010), como los de la región de estudio.

Una vez identificadas diferencias entre las calidades de estación, es importante conocer la diferencia de cada variable entre las calidades de estación con la finalidad de identificar el grupo de varia-

bles que podrían apoyar al entendimiento espacial de la productividad.

Los resultados del análisis de varianza realizado al grupo de variables físicas estima que la variable asnm no tuvo diferencias significativas ($\alpha \leq 0{,}05$) entre los sitios con diferente productividad (Tabla 3). Al respecto, Spurr y Barnes (1982) y Eguiluz (1982) mencionan que los factores ambientales que más influyen sobre la productividad del bosque son los climáticos, edáficos y biológicos, mientras que la altura, aunque influye en la delimitación del área óptima de desarrollo de las especies, tiene una mayor influencia sobre su distribución.

La pendiente, disección vertical, exposición, temperatura mínima, temperatura máxima y profundidad de suelo presentaron diferencias significativas ($\alpha \leq 0{,}06$) (Tabla 3). Estos resultados coinciden con estudios realizados en bosques del centro de México y noroeste de Estados Unidos, donde se encontró que la

Tabla 2. Coeficientes Canónicos Estandarizados (CCE) y variables que influyen sobre la calidad de estación en el sur de Chihuahua, México.

Variable	*CAN1*	*CAN2*
Asnm	0,18443	-0,34208
Pendiente	-0,26774	0,23286
Profundidad de suelo	0,42830	0,15509
Pedregosidad	-0,27038	0,08543
Suelo desnudo	0,09848	-0,10904
Grosor de mantillo	0,26814	0,01415
Hojarasca	0,10773	-0,02531
Disección horizontal	0,11665	0,26618
Disección vertical	-0,59968	0,27544
Exposición	-0,42088	-0,10468
Temperatura mínima	0,22402	0,59289
Temperatura Máxima	0,49133	0,23916
Precipitación	0,48251	0,10239

Variable canónica 1 (CAN1) dada por pendiente, profundidad de suelo, disección vertical, temperatura máxima y precipitación y la variable canónica 2 (CAN 2) por temperatura mínima, disección horizontal.

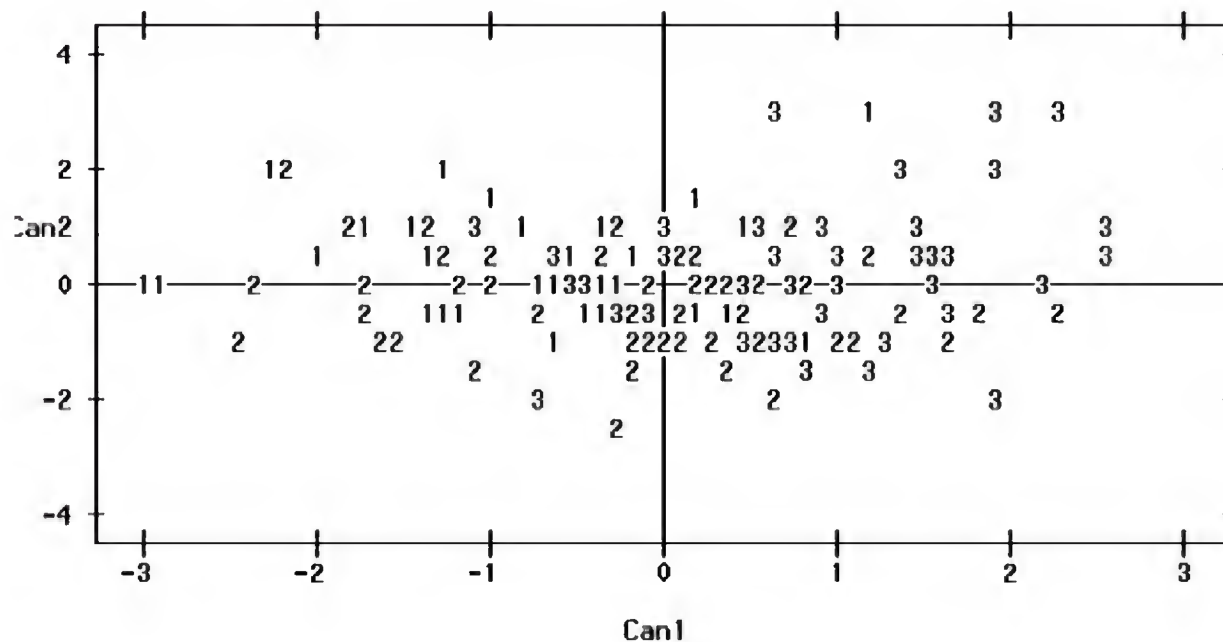


Figura 4. Separación de las variables canónicas.

Separación de grupos a partir de valores canónicos de calidad de estación. Los niveles corresponden a 1= Calidad de estación mala, 2 = Calidad de estación media y 3 = Calidad de estación alta.

productividad se ve afectada por la pendiente, exposición y profundidad de suelo (Griffiths *et al.*, 2009; Gómez Tagle, 1985; Chávez y Gómez Tagle, 1985).

Las variables pedregosidad, porcentaje de suelo desnudo, grosor de mantillo, grosor de hojarasca y precipitación no mostraron diferencias significativas ($\alpha \leq 0,05$) entre las calidades de estación (Tabla 3). Esto puede deberse a la complejidad del territorio estudiado o a las actividades de intenso manejo que se desarrollan en el área de estudio, las cuales podrían modificar las características del suelo, del material orgánico sobre el suelo y del material en descomposición (Nave *et al.*, 2010; Poeplau *et al.*, 2011; Vincent *et al.*, 2010). Aunque diversos estudios han mostrado que los componentes del suelo ejercen una marcada influencia en la productividad del sitio y el desarrollo del arbolado; por ejemplo, Mader (1976) menciona que las características del suelo explican alrededor de 60% de la productividad, mientras que Sánchez y Chacón (1986) encontraron diferencias notables en rocosidad y profundidad de suelo en relación con la productividad de *Pinus arizonica* en el norte de Chihuahua, México, por su parte Narváez (1990) encontró que el pH, el grosor de mantillo y las características del horizonte A influyen sobre el potencial productivo del bosque. Sin embargo, a diferencia de las variables de clima y relieve, las variables de suelo pueden ser afectadas fuertemente por disturbios naturales o por factores antropogénicos como las cosechas y el manejo (Heiberg y Whithe, 1956), lo cual dificulta la identificación de influencia de macrovariables, sobre todo en estudios de tipo regional. Ante esto, se han aplicado estrategias como el uso de variables que caracterizan al relieve para definir características del suelo. Ésta ha sido una práctica útil para caracterizar suelos en extensas regiones (Thiers y Gerding, 2007).

La tabla 4 muestra los valores medios para cada variable en cada calidad de

Tabla 3. Análisis de varianza comparación de variables ecológicas entre sitios (productividad alta, media y baja)

Variable	*Suma de cuadrados*	*Cuadrado medio*	*Fc*	*Significancia*
Altura sobre el nivel del mar (m)	461386,09467	230693,04733	2,23822	0,109659
Pendiente (grados)**	0,21467	0,10734	3,99936	0,020047
Profundidad de suelo (cm)*	527,35401	263,67700	0,69847	0,012343
Pedregosidad (%)	0,15431	0,07716	2,33223	0,100090
Suelo desnudo (%)	0,00240	0,00120	0,05643	0,945152
Grosor de mantillo (cm)	4,31110	2,15555	2,03871	0,133350
Grosor de hojarasca (cm)	0,07070	0,03535	0,64367	0,526795
Disección horizontal (m/km^2)	665331,51108	332665,75554	0,59109	0,554842
Disección vertical (m/km^2)**	170835,01070	85417,50535	11,22476	0,000026
Exposición*	5,71505	2,85753	2,82671	0,061883
Temperatura mínima (°C)**	37,37838	18,68919	3,26125	0,040670
Temperatura máxima (°C)**	86,15165	43,07583	5,20779	0,006349
Precipitación (mm)	1219,02285	609,51142	0,04307	0,0957852

estación. Estos valores pueden ser utilizados para crear modelos espaciales (mapas) para la elaboración de un modelo general de productividad en la región de estudio. La temperatura mínima y la temperatura máxima mostraron sensibles diferencias. Por su parte, no se identificaron diferencias significativas en el análisis para la variable precipitación.

Al respecto, Anaya *et al*. (1980) señalan que las principales variables que influyen sobre el crecimiento en altura y diámetro de las coníferas son las climáticas, como las temperaturas extremas y la precipitación. No obstante, en territorios con homogeneidad en las variables climáticas, como en el caso de la región de estudio, es complicado encontrar diferencias significativas.

Los valores de las variables climáticas (Tabla 4) también pueden ser usados para reclasificar modelos espaciales para definir regiones con diferente productividad. Estos datos podrían sumarse a las variables de relieve y suelo para desarrollar un modelo espacial de productividad.

Tabla 4. Medias y desviaciones estándar de las variables físicas por sitios (productividad alta, media y baja)

Variable	*P. Baja*		*P. Media*		*P. Alta*	
	Media	*Dev. Std.*	*Media*	*Dev. Std.*	*Media*	*Dev. Std.*
Pendiente (grados)	37	15	30	15	12	8
Profundidad de suelo (cm)	25,82	17,49	35,48	18,73	43,73	11,05
Pedregosidad (%)	0,29	0,2	0,22	0,17	0,21	0,18
Suelo desnudo (%)	0,12	0,1	0,13	0,14	0,13	0,17
Grosor de mantillo (cm)	1,51	0,84	1,64	0,84	1,9	1,27
Grosor de hojarasca (cm)	0,58	0,22	0,63	0,22	0,64	0,25
Disección horizontal (m/km^2)	1833,65	781,46	1704,69	730,78	1828,79	752,79
Disección vertical (m/km^2)	311,23	90,86	238,51	84,51	234,25	87,89
Exposición (rumbo)	S, SE		NW, S y SW		N, NW y Z	
Temperatura mínima (°C)	5	2	4	1	8	3
Temperatura máxima (°C)	23	3	23	2	18	3
Precipitación (mm)	794	43	897	92	901	116

CONCLUSIONES

El uso de modelos de índice de sitio permitió definir niveles de productividad en la zona de distribución de *Pinus arizonica* y *P. engelmannii*, así como identificar las variables con mayor relación sobre la productividad de los sitios en la región sur del estado de Chihuahua.

Los análisis de discriminante canónico y de varianza identificaron diferencias significativas en las variables físicas (profundidad de suelo, pendiente, disección vertical, temperatura mínima y temperatura máxima). Los promedios e intervalos de estas variables pueden ser de gran utilidad para el desarrollo de cartografía de potencial productivo en la región de estudio.

Las variables pedregosidad, porcentaje de suelo desnudo, grosor de mantillo y grosor de hojarasca, no mostraron diferencias significativas entre los estratos con diferente productividad. Esto puede deberse a que son variables fáciles de modificar por acciones de manejo de los recursos.

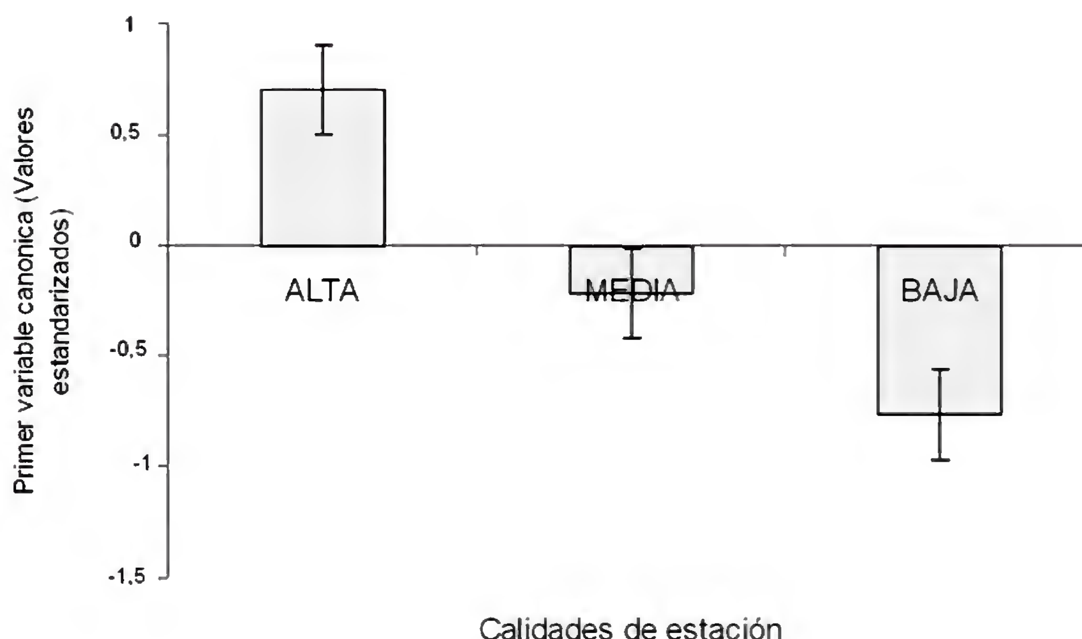


Figura 5. Diferencias multivariadas por calidad de estación

RECONOCIMIENTOS

Se agradece al fondo sectorial Conafor-Conacyt, quien financia el proyecto "Estudio para determinar el potencial productivo de bosques templados" (C03-10027) y a los silvicultores del sur de Chihuahua por el apoyo brindado para desarrollar el trabajo de campo.

REFERENCIAS

Anaya, L.A., S.R. Hernández y H.S. Madrigal. 1980. La vegetación y los suelos de un transecto altitudinal del declive occidental del Iztaccíhuatl. Bol. Tec. 65. INIF, SFF, México. 79 p.

Castaños, M.L. 1962. Evaluación de la calidad de estación de *Pinus patula* en el norte de Oaxaca. Bol. Tec. INIF 2. 32 p.

CETENAL (Centro de Estadísticas del Territorio Nacional). 1972. Carta de climas Esc. 1:250000 CETENAL, México. 1 p.

Chávez, H.M.Y.M. y R.AF. Gómez-Tagle. 1985. Principales interacciones entre los suelos forestales y las coníferas del Cerro de la Cruz. Mich. Bol. Téc. núm. 10, INIF, México 32 p.

Clutter, J.L., J.C. Fortson, L.V. Pienaar y R.L. Bailey. 1983. Timber management: A quantitative approach. Wiley. Nueva York. 333 p.

Daniel, T.W., J.A. Helms y F.S. Baker. 1982. Principios de silvicultura. McGraw Hill. México. 492 p.

Deo-Singh, K. 2013. Estimating potential productivity of forests. Environmental Science and Ingeniering. p:147-158.

Eguiluz, P.T. 1977. Los pinos del mundo, Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México. Publicación especial núm.1. 75 p.

Eguiluz, P.T. 1982. Clima y distribución del género *Pinus* en México. Revista Ciencia Forestal en México 38(7): 30-44.

FPC (Forest Productivity Council) B.C. 1998. Minimum Standards and Stem Analysis Procedures for Site Index Research. Victoria, BC. 9 p.

García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köeppen, (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana), UNAM, 3a. ed, México, D.F.

Gómez-Tagle, R.AF. 1985. Levantamiento de suelos del Campo Experimental Forestal Barranca de Cupatitzio y sus relaciones con la vegetación de coníferas, Tesis de maestría, Fac. Ciencias, UNAM, México. 135p.

Griffiths, R.P., M.D. Madritch y A.K. Swanson. 2009. The effects of topography on forest soil characteristics in the Oregon Cascade Mountains (USA): Implications for the effects of climate change on soil properties. Forest Ecology and Management 257(1): 1-7.

Hair, J.F.Jr., R.E. Anderson, R.L. Tatham y W.C. Black. 1998. Multivariate data analysis. 5a. ed. Prentice-Hall. EUA.

Heiberg, S.O. y D.P. White. 1956. A site evaluation concept. Journal of forestry 54:7-10.

IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2006. Sistema de bases de datos meteorológicas. ERIC Ver. 3. México.

Karhu, K., H. Fritze, M. Tuomi, P. Vanhala, P. Spetz, V. Kitunen y J. Liski. 2010. Temperature sensitivity of organic matter decomposition in two boreal forest soil profiles. Soil Biology and Biochemestry 42 (1):72-82.

Latta, G., H. Temesgen, D. Adams y T. Barrett. 2010. Analysis of potential impacts of climate change on forests of the United States Pacific Northwest. Forest Ecology and Management 259(4):720-729.

Latta, G., H. Temesgen y T.M. Barret. 2009. Mapping and imputing potential productivity of Pacific Northwest forests using climate variables. Canadian Journal of Forest Research 39(6):1197-1207.

Mader, D.F. 1976. Soil-site productivity for natural stands of white pine in Massachusetts. Soil Science Society American Journal 40:112-115.

Madrigal, H.S. 2002. Evaluación del potencial productivo de sitio forestal para *Pinus oocarpa* en el ejido Patuan, municipio de Ziracuaretiro, Michoacán. *In*: IV Congreso Forestal Mexicano. Morelia, Michoacán. Asociación de Profesionales Forestales A.C. 1 p.

Martínez, S.M., R.A. Olivas, R.V. Cepeda y L.B. Morales. 2006. Clasificación de potenciales naturales en los bosques templados del sur de Chihuahua. Folleto Técnico núm. 35. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México. 33 p.

Martínez, S.M. 2008. Potencial productivo y zonificación forestal para el reordenamiento silvícola en bosques templados. Folleto Técnico núm. 37. Inifap, C.E. La Campana. Chihuahua, Chih., Méx. 52 p.

Mas P.J. 1970. Instructivo para realizar análisis troncales. Bol. Div. Inst. Nal. de Invest. Ftales núm. 23. México. 23 p.

Medlyn, B.E., R.A. Duursma y M.J.B. Zeppel. 2011. Forest productivity under

climate change: a checklist for evaluating model studies. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 2(3):332-355.

Musalem, S.M., C. Rodríguez, F. Carrillo y G. Vera. 1986. Proyecciones de la investigación silvícola en los suelos forestales de México. INIFAP. Inédito 25 p.

Narváez, F.R. 1990. El suelo en relación con los tipos de vegetación y su productividad en el área experimental forestal Madera, Chihuahua. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. México, D.F. 109 p.

Nave, L.E., E.D. Vance, C.W. Swanston y P.S. Curtis. 2010. Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests. Forest Ecology and Management 259(5):857-866.

Palahí, M., M. Tome, T. Pukkala, A. Trasobares y G. Montero. 2004. Site index model for *Pinus sylvestris* in north east Spain. Forest Ecology and Management (187):35-47.

Peters, E.B., K.R. Wythers, J.B. Brandford y P.B. Reich. 2013. Influence of disturbance on temperate forest productivity. Ecosystems 16(1):95-110.

Poeplau, C., A. Don, L. Vesteral, J. Leifeld, B.V. Wesemael, J. Schumacher y A. Gensior. 2011. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone-carbon response functions as a model approach. Global Change Biology 17(7):2415-2427.

Pritchett, L.W. 1986. Suelos forestales (propiedades, conservación y mejoramiento). Limusa. México. 634 p.

Raz-Yaseef, N., E. Rotenberg y D. Yakir. 2010. Effects of spatial variations in soil evaporation caused by tree shading on water flux partitioning in a semi-arid pine forest. Agricultural and Forest Meteorology 150(3):454-462.

Rodríguez, F.C. 1982. Determinación de la calidad de estación de *Pinus montezumae* Lamb, a través de análisis troncales en el CEF San Juan Tetla, Puebla. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. 134 p.

Rzedowski, R.J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México, D.F. 432 p.

Sánchez, C.J. y S.J. Chacón. 1986. Relación suelo-vegetación del área experimental forestal madera, INIFAP. Ciencia Forestal 11(59):41-64.

Spurr, S.H. 1952. Forest Inventory. Ronald Press. Nueva York, EUA. 476 p.

Spurr, S.H. y B.V. Barnes. 1982. Ecología Forestal, México. AGT, Editor. 690 p.

Stoler, A.B. y R.A. Relyea. 2011. Living in the litter: the influence of tree leaf litter on wetland communities. Oikos 120(6):862-872.

Tellez, V.O., H.MYM. Chávez, R.A.F. Gómez-Tagle y G.M. Gutiérrez. 2004. Modelado bioclimático como herramienta para el manejo forestal: Estudio de cuatro especies de *Pinus*. Revista Ciencia Forestal en México 95(29):61-82.

Thiers, O. y V. Gerding. 2007. Variabilidad topográfica y edáfica en bosques de *Nothofagus betuloides* (Mirb) Blume, en el suroeste de Tierra del Fuego, Chile. Revista chilena de historia natural 2(80):201-211.

Vincent, A.G., B.L. Turner y E.V.J. Tanner. 2010. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist forest. European Journal of Soil Science 61(1):48-57.

Manuscrito recibido el 30 de noviembre de 2010.
Aceptado el 13 de mayo de 2013.

Este documento se debe citar como:
Martínez-Salvador, M., R. Valdez-Cepeda y M. Pompa-García. 2013. Relación de variables físicas en la productividad de *Pinus arizonica* y *Pinus engelmannii* en el sur de Chihuahua, Méx. Madera y Bosques 19(3):35-49.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Efecto de la micorrización en el establecimiento de *Pinus pseudostrobus* en cárcavas

Effect of mycorrhyzation in the establishment of *Pinus pseudostrobus* in gullies

Mariela Gómez-Romero,*[1] Javier Villegas,[2]
Cuauhtémoc Sáenz-Romero[3] y Roberto Lindig-Cisneros[4]

RESUMEN

Se evaluó el establecimiento de *Pinus pseudostrobus* Lindl., en tres condiciones de propagación y trasplante en cárcavas desprovistas de vegetación en la localidad de Atécuaro, municipio de Morelia, Michoacán. La primera condición corresponde a plantas de procedencia conocida, germinadas y propagadas en condiciones controladas (estratificadas a 4 °C, germinadas a 25 °C con 12 h luz y propagadas con riego cada tercer día), para contar con dos lotes de plantas, uno con inóculo y otro sin inóculo del hongo ectomicorrícico *Pisolithus tinctorius* (Pers.) Coker *et* Couch. Como una segunda condición, ambos lotes fueron trasplantados al sitio de plantación a los 15 meses de edad con adición de sustrato fértil (fibra de coco, corteza de árbol y agrolita) en las cepas. En otro sitio muy cercano, una tercera condición fue una reforestación convencional con plantas de la misma especie pero sin controlar las variables antes descritas. Se evaluó altura, diámetro a la altura de la base, cobertura, número de ramas y porcentaje de supervivencia. Los resultados muestran que los pinos que fueron plantados bajo las primeras condiciones presentaron mayor crecimiento y supervivencia que los pinos de la segunda reforestación (tercera condición) ($P < 000,1$). La supervivencia de los pinos inoculados fue de 86%, la de la misma plantación sin inóculo 62% y la de la segunda reforestación 30%. La inoculación se plantea como una estrategia a aplicar en proyectos de restauración de sitios severamente degradados y erosionados, planteándose la necesidad de una inversión que incremente el éxito en los programas de reforestación.

PALABRAS CLAVE
Erosión, *Pisolithus tinctorius,* propagación, reforestación, restauración ecológica.

ABSTRACT

The establishment of *Pinus pseudostrobus* Lindl. was evaluated in three conditions of propagation and transplantation in gullies devoid of vegetation in the locality of Atécuaro, Municipality of Morelia, Michoacán. The first condition correspond to plants of known provenance, germinated and propagated under controlled conditions (stratified at 4 °C, germinated at 25 °C with 12 h of light and watered every other day), with the aim of having plants without mycorrhizae and with the ectomycorrhizal fungus *Pisolithus tinctorius* (Pers.) Coker *et* Couch. As a second condition, both groups where transplanted at 15

1 Doctorado Institucional en Ciencias Biológicas. Instituto de Investigaciones Químico Biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Morelia, Michoacán, México.
2 Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, UMSNH, Morelia, Michoacán, México.
3 Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales. UMSNH, Morelia, Michoacán, México.
4 Laboratorio de Ecología de Restauración. Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIEco), Morelia, Michoacán, México.
* Autor para correspondencia: C.e.: mariela_gomez@enesmorelia.unam.mx; margrbio13@hotmail.com

months of age with the addition of a fertile substrate (coconut fiber, bark and agrolite). In a nearby site, a third condition was a reforestation with plants of the same species but without controlling the aforementioned variables. The results show that the pine trees that were planted in the first condition performed better and had a higher survival than plants in the second reforestation (third condition) (P < *000,1*). The survival of inoculated pines was 86%, in the absence of the fungus was 62% and 30% in the second reforestation. Inoculation is a good strategy for restoration projects in severely degraded and eroded sites, although it increases the costs it also increases survival and growth.

KEY WORDS
Erosion, *Pisolithus tinctorius,* propagation, reforestation, ecological restoration.

INTRODUCCIÓN

Por el creciente deterioro de los recursos forestales en México, existe la necesidad de reforestar y restaurar eficientemente, tanto con fines comerciales como para recuperación de suelos (Cetina-Alcalá *et al.,* 1999). El estado de Michoacán posee importantes recursos forestales por su cantidad, diversidad e importancia económica. Ocupa el tercer lugar nacional en producción de madera (aproximadamente 1 x 10^6 m^3/año, después de Chihuahua y Durango) y el primer lugar nacional en producción de resina (35 000 t/año), no obstante que ocupa el sexto lugar nacional en existencias maderables (COFOM, 2001). En cuanto a riqueza de especies, Michoacán tiene el quinto lugar nacional en biodiversidad (COFOM, 2001) con 4831 especies vegetales. Destaca, entre otros, el género *Pinus* con 16 especies (Conabio *et al.*, 2005). Se ha publicado que *Pinus pseudostrobus* Lindl., es una de las especies forestales de mayor importancia en México. Es un árbol de 15 m a 25 m, se encuentra en laderas con elevaciones de 1600 msnm a 3200 msnm con temperatura de 9 °C a 40 °C con media de 14 °C, con precipitaciones de 500 mm a 2000 mm con media de 1000 mm (Cruz de León, 1991). Se utiliza para la restauración de suelos degradados (Conafor, 2006), es buen productor de resina, ampliamente aprovechada en los estados del centro y sur del país. La madera es de buena calidad. Es una especie recomendable para plantaciones comerciales, también para su uso ornamental (Eguiluz, 1978). Por otro lado, en el estado de Michoacán existen serios problemas de deforestación; se calcula que se pierden entre 30 000 ha y 40 000 ha de bosque por año. Las principales causas de la deforestación son: cambio de uso del suelo, incendios forestales y tala ilegal (COFOM, 2001). En un estudio realizado con la finalidad de hacer una evaluación sobre los programas de reforestación en Michoacán y proponer estrategias que aumenten el éxito de establecimiento (Sáenz-Romero y Lindig-Cisneros, 2004), se menciona que existen serios problemas en cuanto al proceso de plantación y mantenimiento de las reforestaciones (Lindig-Cisneros *et al.,* 2005), disminuyendo significativamente la supervivencia de las plantas. Entre los principales problemas detectados se encuentran la técnica de plantación (falta de capacitación del personal de campo, falta de herramientas adecuadas y falta de preparación del terreno previo a la plantación), fecha inadecuada de plantación (temporada de lluvias avanzada, limitando a las plantas para establecer un sistema radical suficiente, antes del inicio de la temporada de sequía) y a la pobre calidad de la planta, que representa hasta 15% de la mortalidad (Nienstaedt, 1994; Sáenz-Romero y Martínez-Palacios, 2000).

Por otro lado, se ha documentado que en la restauración ecológica se debe dirigir al ecosistema a través de una serie de fases hasta recuperar su estructura, la composición de especies y su función original (Martínez, 1996). En las estrategias de restauración de suelos degradados, es

determinante el uso de la microbiota del suelo (Haselwandter, 1997; Requena *et al.*, 2001; Álvarez, 2009), en especial de hongos formadores de micorrizas, ya que previenen la erosión del suelo al ser un factor en la formación de agregados y en la acumulación de materia orgánica. De esta manera, le dan estructura al suelo y reducen o evitan el efecto de la erosión tanto hídrica como eólica, así como la consecuente pérdida de nutrientes. Además, la asociación micorrícica otorga ventajas para el establecimiento de las plantas ante condiciones estresantes, como la habilidad de la planta hospedera para resistir a las condiciones de sequía (Haselwandter, 1997; Álvarez, 2009). La micorrización de varias especies de angiospermas y gimnospermas con hongos ectomicorrícicos ha tenido éxito, sobre todo en experimentos *in vitro* y, en menor cantidad, en condiciones de vivero. Entre los géneros más utilizados se encuentran *Hebeloma, Laccaria, Rhizophogon, Scleroderma*, *Suillus* y *Pisolithus* (Pera y Parladé 2005). Por otra parte, la inoculación en vivero para plantas destinadas a la repoblación, se ha realizado con especies cosmopolitas, como *Sclerodema sp.* y *Pisolitus tinctorius* (Valdés *et al.,* 2010). El interés en utilizar *Pisolithus tinctorius*, se deriva de su éxito en la inoculación de plantas forestales en países de los cinco continentes. Las plantas con las que *P. tinctorius* establece simbiosis ectomicorrícica incluyen más de veinte géneros de gimnospermas y angiospermas con distribución mundial; incluyendo especies forestales de las familias *Casuarinaceae, Dipterocarpaceae, Pinaceae, Myrtaceae* y *Oleaceae* (Pérez-Moreno y Read, 2004; Ambriz *et al.,* 2010). El cuerpo fructífero de este hongo mide entre 5 cm y 20 cm de altura y hasta 10 cm de diámetro, fibroso de color pardo amarillento, esporas de color marrón canela, globosas de 7 µ a 12 µ y espinas de hasta 2 µ de largo. Fructifica al comienzo del otoño. Un aspecto muy importante es que puede sobrevivir en suelos empobrecidos o terrenos perturbados, así como en suelos de alta acidez, o con altas concentraciones de metales pesados y resiste periodos de estrés por sequía (García-Rodríguez *et al.,* 2009).

OBJETIVOS

Evaluar las plantas de *Pinus pseudostrobus* en un experimento en condiciones de restauración ecológica en presencia/ausencia de inoculación del hongo ectomicorrícico *Pisolithus tinctorius*. Comparar las plantas en condiciones de restauración con las de una reforestación convencional, con la finalidad de identificar las estrategias que mejoren la supervivencia y desempeño de las plantas para su establecimiento en un sitio severamente degradado y de esa forma recuperar una cobertura vegetal.

MATERIALES Y MÉTODO

Área de estudio

El área de estudio se ubica en el paraje conocido como Huertitas, ejido de Atécuaro, municipio de Morelia en Michoacán (Fig. 1a), lugar desprovisto de vegetación en donde se dan altas tasas de erosión en suelos acrisoles (acrisol ócrico), y existen numerosas cárcavas en al menos 6% de la superficie total. Presenta pendientes de 18% en promedio, por lo que es muy sensible a la erosión hídrica. El resto del paisaje está calculado en 46% de pastizales y 28% de tierras de cultivo (Duvert *et al.*, 2010). La erosión en cárcavas, como consecuencia de la deforestación y técnicas de cultivo inadecuadas, han sido identificadas en más de 65% de la superficie de los suelos del país (Covaleda, 2008), por lo que las consecuencias de la degradación acelerada ha dado como resultado suelos sin capacidad de mantener la vida

vegetal. Un ejemplo claro se presenta en los suelos acrisoles; según la FAO-ISRIC (2006), estos suelos han sido clasificados como suelos evolucionados, que se han desarrollado principalmente sobre rocas muy ácidas o arcillas muy meteorizadas, que sufren posterior degradación. Se caracterizan por presentar un contenido mayor de arcillas en los horizontes más profundos como resultado de procesos pedogenéticos. Los acrisoles tienen, a ciertas profundidades, una baja saturación de bases y arcillas de baja actividad. Por lo general, estos suelos son arcillosos y tienden a compactarse cuando carecen de cobertura vegetal, impidiendo la infiltración del agua (Covaleda, 2008).

La zona presenta un clima subhúmedo, con lluvias en verano, temperatura media anual de 13,8 °C y precipitación media anual de 1000 mm con una descarga media durante la época de secas de 0,05 ls^{-1} -1,0 ls^{-1} y en la época de lluvias de 10 ls^{-1} - 30 ls^{-1}, una altitud de 2150 msnm - 2450 msnm (Duvert *et al*., 2010).

Establecimiento de pruebas de restauración

Plantación sitio A

En el año 2009 se estableció un experimento con fines de restauración con *Pinus pseudostrobus*. Las semillas procedentes de la región (Nuevo San Juan Parangaricutiro) se estratificaron a 4 °C (como tratamiento pregerminativo) en condiciones controladas, fueron desinfectadas previamente con hipoclorito de sodio comercial al 20% (NaClO 20 ml: 80 ml H_2O), y posteriormente se colocaron en cajas de Petri con papel filtro como sustrato humedecido con 2 ml de agua destilada. Las cajas fueron selladas con parafilm (R) y permanecieron durante 15 días a una temperatura de 4 °C. Una vez transcurrido este tiempo, se trasladaron a una cámara de crecimiento a una temperatura constante de 25 °C con 12 horas luz, manteniendo la humedad constante durante el proceso de germinación que fue de 21 días. Después de este periodo, se realizó el trasplante una vez que la radícula ya estaba emergida. Las plántulas fueron propagadas en una casa de sombra en contenedores rígidos de plástico medianos (350 cm^3), se utilizó un sustrato comercial a base de fibra de coco, corteza de árbol y agrolita mezclado con arena en combinación 1:1 y esterilizado. A las cuatro semanas de edad, la mitad de las plantas de pinos fueron inoculadas con 500 000 esporas del hongo ectomicorrícico *Pisolithus tinctorius* (el inóculo fue adquirido de manera comercial Biosyneterra Solutions Inc. L'Assomption, Quebec, Canadá) por cada planta. Formando dos tratamientos, uno de plantas inoculadas y otro de plantas sin inoculación, se consideraron 90 réplicas por cada tratamiento en un diseño completamente al azar. Posteriormente, a los tres meses de edad, se realizó un trasplante a bolsa de vivero de 600 cm^3, con mayor cantidad de sustrato y se mantuvieron en casa de sombra durante 11 meses más, con riego constante cada tercer día. Posteriormente, las plantas se sacaron de la casa de sombra para su endurecimiento durante quince días antes de ser llevadas a campo.

Una vez que inició la época de lluvias, las plantas fueron transportadas a campo en cajas perforadas de plástico para facilitar el traslado hasta el sitio de estudio, donde permanecieron durante un día antes de ser trasplantadas. En la cepa de 40 cm^3 se adicionó ½ litro del medio de cultivo antes descrito y se realizó el trasplante a los 15 meses de edad de las plantas, con el cuidado suficiente para que las raíces no quedaran dobladas o expuestas y se cubrió bien la cepa con sustrato del sitio en un diseño completamente al azar con 90 réplicas por tratamiento.

Plantación sitio B

En el mismo año se localizó otra plantación en una cárcava aledaña muy cercana (177 m) con condiciones muy similares de pendientes, en el mismo tipo de sustrato y plantadas al mismo tiempo (Fig. 1b). La plantación con *Pinus pseudostrobus* se trataba de una reforestación convencional, de las que se hacen anualmente en la región. Sin embargo, se desconoce la edad de las plantas al tiempo del trasplante, así como las condiciones de almacenamiento de la semilla, germinación, propagación o endurecimiento de la planta previo a la reforestación, incluso, la procedencia de las semillas (mismas condiciones de los programas de reforestación anuales). Se evaluaron también 90 plantas para que fueran comparables con las del experimento de restauración. Se sabe que, dadas las condiciones de las planta-

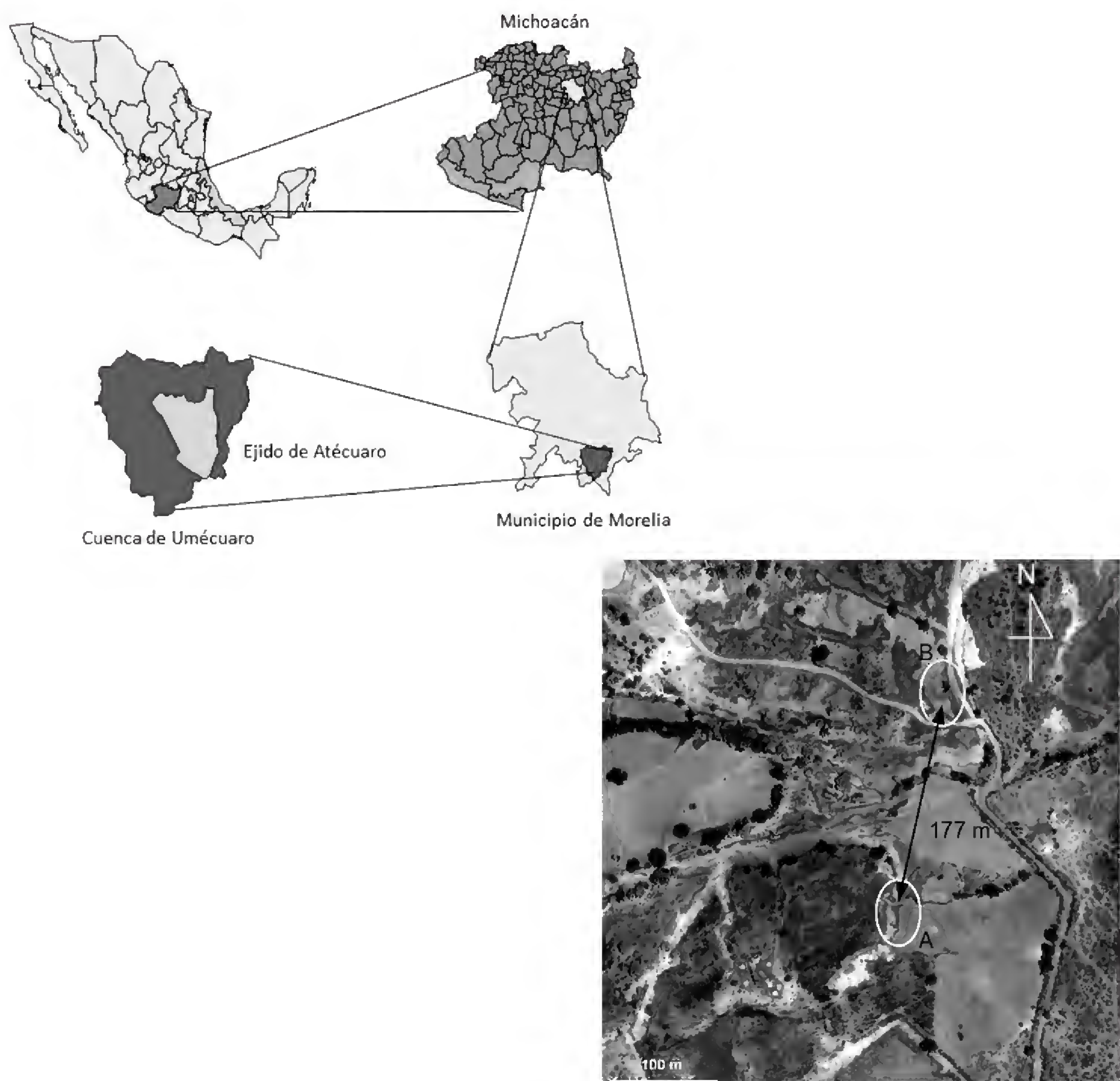


Figura 1a. Ubicación del área de estudio. 1b Sitios de estudio en la localidad de Atécuaro, municipio de Morelia, Michoacán. A) Sitio donde se encuentran los experimentos de restauración. B) Sitio donde se encuentra la reforestación convencional.

ciones en dos sitios diferentes, ocurre que si se consideraran todos los datos como un solo experimento, un tratamiento completo (Sitio B) se encuentra en un sitio diferente, lo que corresponde a una pseudorréplica *sensu* Hurlbert (1984). A pesar de lo anterior se incluyeron los datos del sitio B por ser una comparación útil (como testigo), pero se debe reconocer que las diferencias podrían deberse a factores inherentes a los dos sitios y no a otras diferencias.

Evaluaciones

Se realizó la evaluación de altura total, diámetro a la altura de la base (DAB) con un vernier tomada en centímetros, cobertura en cm^2 obtenida a partir de la evaluación de dos diámetros de la copa e inferida mediante la fórmula de la elipse ($r_1 r_2 \pi$), número de ramas y supervivencia a las plantas al tercer año de edad de establecidas las plantaciones de restauración en presencia/ausencia de inoculación con *Pisolithus tinctorius* (sitio A), y a las plantas de la reforestación convencional (sitio B). Los datos fueron analizados mediante Análisis de Varianza (ANOVA) en el paquete estadístico R (R Development Core Team, 2011). El análisis principal se realizó tomando en cuenta inicialmente sólo los datos del experimento del sitio A, al ser éste un diseño estadísticamente robusto y, de manera adicional, un segundo análisis, consistió en comparar una plantación de reforestación convencional con la de restauración. Para analizar la supervivencia se siguió la misma estrategia, pero a través de análisis de modelos lineales generalizados (GLM) para datos con distribución binomial.

RESULTADOS

Las plantas se desempeñaron de manera diferente dependiendo de la forma en que fueron propagadas y trasplantadas en el sitio. Al comparar las plantas de la reforestación en el sitio A, en función de la presencia/ausencia de inóculación con el hongo ectomicorrízico *Pisolithus tinctorius,* no se obtuvieron diferencias significativas para variables de crecimiento (altura $F_{(1,267)} = 0{,}27$, $P = 0{,}604$, diámetro a la altura de la base $F_{(1,267)} = 2{,}45$, $P = 0{,}119$, cobertura $F_{(1,267)} = 0{,}782$, $P = 0{,}779$ y ramas $F_{(1,267)} = 2{,}42$, $P = 0{,}12$). Sin embargo, para la supervivencia sí se presenta un incremento significativo en las plantas inoculadas. Por otro lado, al hacer la comparación de las plantaciones de los sitios A y B se presentaron diferencias estadísticamente significativas en todas las variables de crecimiento y en supervivencia.

En términos de la altura, cuando se analizan sólo los tratamientos del experimento de inoculación no hay diferencias significativas, pero cuando se incluyen los datos de las plantas de la reforestación convencional (sitio B), sí se presentan diferencias estadísticamente significativas ($F_{(2,267)} = 87{,}87$, $P < 0{,}0001$). La altura de los tratamientos de restauración en presencia/ausencia de hongos micorrícicos (80 cm), contrasta con las plantas de la reforestación convencional (40 cm) (Fig. 2). Para el DAB se presentó un patrón similar, entre tratamientos de inoculación no se presentaron diferencias, pero sí entre las plantas del sitio A y las del sitio B ($F_{(2,267)} = 233{,}75$, $P < 0{,}00001$). Los valores de las plantas de la restauración son de alrededor de 3 cm, mientras que para las de la reforestación es menor a 1 cm (Fig. 3). Para la cobertura, se presentan diferencias altamente significativas entre los tratamientos del experimento de inoculación con los de la reforestación en el sitio B ($F_{(2,267)} = 147{,}07$, $P < 0{,}0001$), con tendencias muy similares a las de la altura, con valores similares entre las plantas de los tratamientos de restauración (40 cm^2) pero muy diferentes a las plantas de la reforestación (10 cm^2) (Fig. 4). Para el

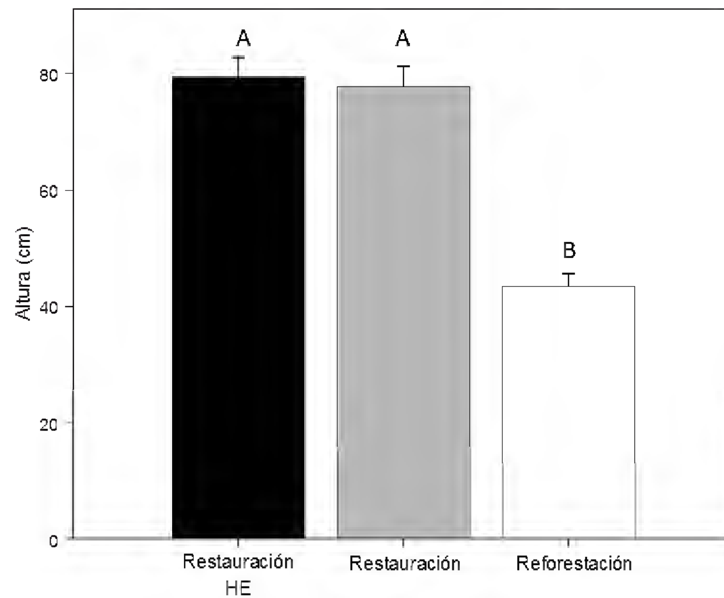


Figura 2. Altura de *Pinus pseudostrobus* en condiciones de restauración ecológica con inoculación de hongo ectomicorrícico (*Pisolithus tinctorius*) (HE), restauración sin inoculación y reforestación convencional. Las barras muestran el error estándar y las letras grupos de acuerdo con la prueba de Tukey.

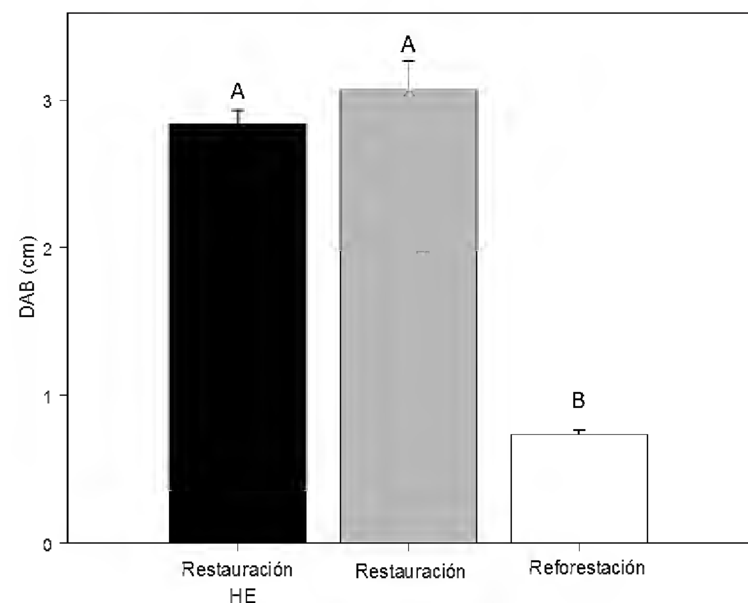


Figura 3. Diámetro de *Pinus pseudostrobus* en condiciones de restauración ecológica con inoculación de hongo ectomicorrícico (*Pisolithus tinctorius*) (HE), restauración sin inoculación y reforestación convencional. Las barras muestran el error estándar las letras grupos de acuerdo con la prueba de Tukey.

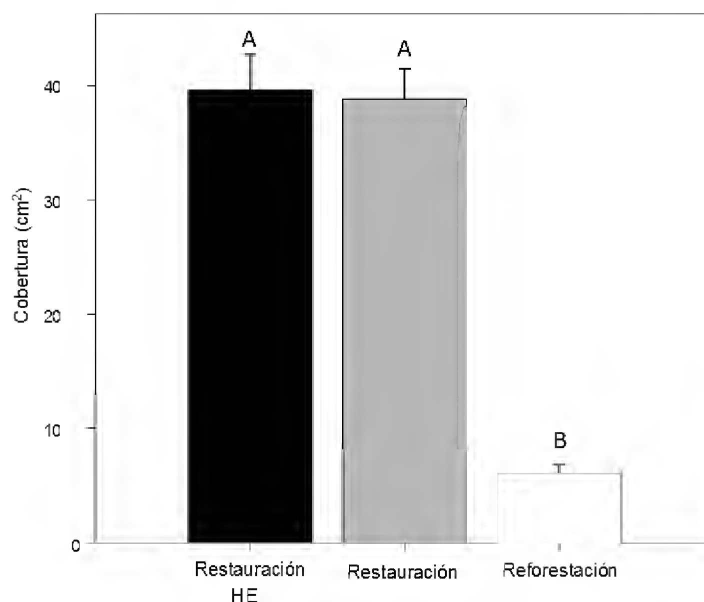


Figura 4. Cobertura de *Pinus pseudostrobus* en condiciones de restauración ecológica con inoculación de hongo ectomicorrícico (*Pisolithus tinctorius*) (HE), restauración sin inoculación y reforestación convencional. Las barras muestran el error estándar las letras grupos de acuerdo con la prueba de Tukey.

número de ramas, se presentan tendencias muy similares, con valores mayores en las plantas del experimento en el sitio A en ausencia de hongos micorrícicos, no siendo diferente de los que se encuentran en presencia de hongos micorrícicos, pero sí estos dos de las plantas de la reforestación en el sitio B ($F_{(2,267)} = 232,78$, $P < 0,0001$) (Fig. 5).

El resultado más interesante se da en términos de los porcentajes de supervivencia; para el experimento de inoculación, las plantas inoculadas presentaron 86% de supervivencia, en ausencia de inóculo 62%, siendo una diferencia en supervivencia estadísticamente significativa ($X^2=13,053$, $g.l.=1$; $P=0,0003$). Si se incluye en el análisis a las plantas presentes en el sitio B correspondientes a las de una reforestación convencional, éstas presentaron 30% de supervivencia al tercer año del trasplante. Al comparar con los tratamientos de inoculación, existe una

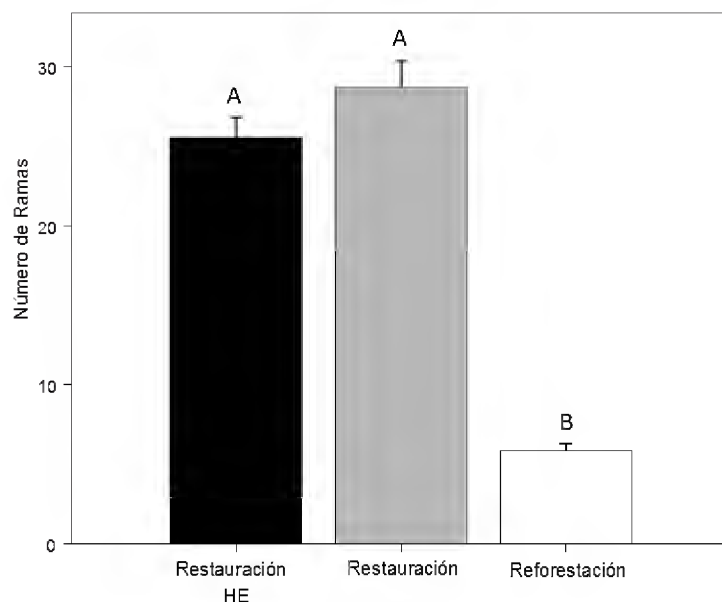


Figura 5. Número de ramas de *Pinus pseudostrobus* en condiciones de restauración ecológica con inoculación de hongo ectomicorrícico (*Pisolithus tinctorius*) (HE), restauración sin inoculación y reforestación convencional. Las barras muestran el error estándar las letras grupos de acuerdo con la prueba de Tukey.

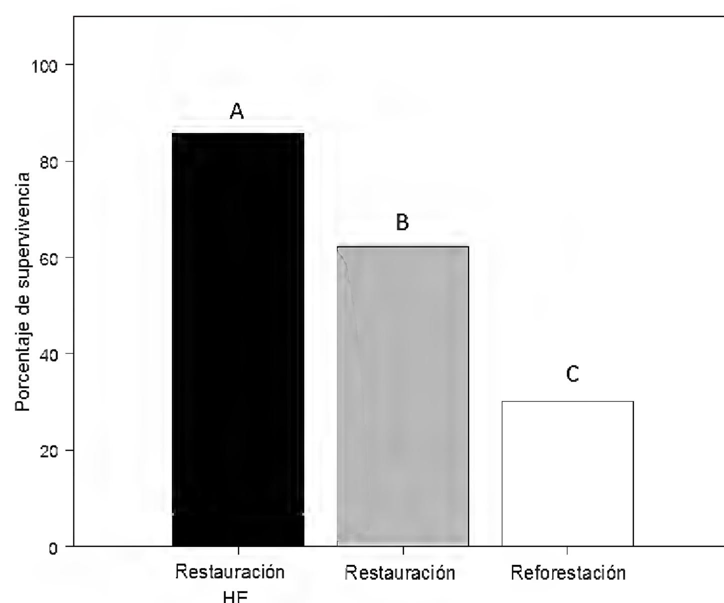


Figura 6. Supervivencia de *Pinus pseudostrobus* en condiciones de restauración ecológica con inoculación de hongo ectomicorrícico (*Pisolithus tinctorius*) (HE), restauración sin inoculación y reforestación convencional. Letras diferentes indican diferencias significativas con p<0,05.

diferencia altamente significativa entre los tres (*X^2=61,366, g.l.=2; P<0,0001*; Fig. 6).

DISCUSIÓN

Los resultados del experimento sugieren que, en condiciones de restauración, con estrés nutricional e hídrico, en cuanto a las variables estudiadas, las plantas inoculadas con el hongo ectomicorrícico *Pisolithus tinctorius*, no responden de manera diferente que las plantas sin inóculo. Sin embargo, sí les confiere beneficios para la adquisición de nutrientes que les provee de mayor supervivencia (86%), lo cual implica una gran ventaja para el establecimiento de las plantas ante estas condiciones. Las plantas en ausencia del inóculo presentaron 62%. Por otro lado, aun cuando la asociación simbiótica puede representar un gasto energético para los pinos, debido a que tienen que intercambiar hidratos de carbono (Choi *et al.,* 2005), la relación es positiva, ya que los hongos micorrícicos proveen de nutrientes y agua a la planta, además de que le ayudan a amortiguar cambios bruscos de temperatura (Smith y Read, 2000).

La disponibilidad de agua tiene el efecto directo de disminuir la turgencia, e indirectamente limita el incremento de biomasa, por lo que una cantidad adecuada de agua disponible es esencial para mantener la productividad de las plantas (Montoya, 2000), de modo que la presencia de micorrizas puede influir de manera importante para tener disponibilidad de agua e incrementar la biomasa, sobre todo en la parte radical. El sustrato, rico en materia orgánica que se adicionó a las plantas del experimento de restauración, muy probablemente también contribuyó a generar los patrones observados, ya que a las plantas de la reforestación convencional no se les suministró ningún sustrato adicional y la materia orgánica del suelo contribuye a un mejor desempeño de las micorrizas. En estas condiciones de reforestación convencional las plantas presentaron 30% de supervivencia.

Arias (1992), menciona que *P. pseudostrobus* plantado bajo buenas condiciones de fertilidad, presenta alta tasa de crecimiento, pero también se ha publicado que no puede prosperar en sitios con condiciones edáficas adversas (Domínguez-Caballero *et al.*, 2001). El presente estudio sugiere que aplicando estrategias adecuadas, esta especie puede mostrar un buen desempeño temprano, aun sobre cárcavas. Pera y Parladé (2005) sugieren que la utilización de plantas micorrizadas pueden jugar un papel importante en la reforestación de zonas fuertemente alteradas. La inoculación con hongos micorrícicos puede incrementar significativamente la supervivencia de *Pinus pseudostrobus* como se muestra en este experimento.

Valdés *et al.* (2010) mencionan que la inoculación con *Pisolithus tinctorius* (cepa 202) a los 18 meses puede incrementar significativamente el volumen y biomasa (2,93 cm^3 y 3,68 g) de *P. pseudostrobus* con respecto al control (2,3 cm^3 y 3,39 g). Por otro lado, se han realizado experimentos con esta especie de hongo ectomicorrícico (*P. tinctorius)* inoculando plantas de *Cistus albidus* en condiciones de campo y mencionan que la inoculación tiene un efecto positivo sobre el crecimiento de las plantas, obteniendo hasta 30% mayor crecimiento que en las plantas control (Alguacil *et al.*, 2003).

En experimentos con *Pinus greggii* inoculados con los hongos ectomicorrícicos *Laccaria laccata*, *Suillus pseudobrevipes*, *Boletus pinophilus* y *Pisolithus tincorius*, Carrera-Nieva y López-Ríos (2004) encontraron diferencias estadísticamente significativas a los nueve meses de inoculación en la altura y biomasa en peso seco de la planta, independiente-

mente del hongo que utilizaron, para la variable diámetro, el hongo que presentó un mayor efecto fue *B. pinophilus.* En el mismo estudio, para la especie *Pinus patula* utilizaron las especies *Laccaria laccata*, *Suillus pseudobrevipes*, *Boletus clavipes, Amanita fulva* y *Amanita caesarea,* encontrando que *L. laccata* es el hongo que presenta un mayor efecto en las variables altura, diámetro y biomasa en peso seco. Por otro lado, en estudios con *Pinus ponderosa* inoculados con los hongos micorrícicos *Suillus luteus*, *Hebeloma mesophaeum* y *Rhizopogon roseolus*, Barroetaveña *et al*. (2012) no encontraron diferencias estadísticamente significativas en el diámetro ni en el largo del vástago, comparativamente con las plantas control.

La respuesta puede deberse tanto a la especie del hongo ectomicorrícico, como a la especie de la planta hospedera debido al reconocimiento en la asociación.

Debido a que ambos sitios se encuentran a una corta distancia (177 m en línea recta), los resultados sugieren que las diferencias entre las plantas del sitio A, el experimento de inoculación y del sitio B se deben a los tratamientos aplicados, aun cuando es posible que se deban a diferencias microambientales como la temperatura, la luz disponible o la humedad (Prince *et al.,* 2001), que no fue posible medir en el presente estudio.

Tomar en cuenta todos los aspectos que se mencionan tanto para la germinación como para la propagación, implica una inversión adicional de recursos económicos que, sin embargo, se compensa por la mejor supervivencia y desempeño general de la plantación y que incluso puede ser calculado (García-Frapolli y Lindig-Cisneros, 2011).

Si no se cuenta con recursos adicionales, se puede reducir el área reforestada y asignar los recursos ahorrados a estas medidas adicionales; esta estrategia incluso permitiría contar con una mayor área reforestada en el largo plazo (Sáenz-Romero y Lindig-Cisneros, 2004).

CONCLUSIONES

La inoculación con el hongo ectomicorrícico *Pisolithus tinctorius* incrementa la supervivencia de *Pinus pseudostrobus* en sitios desprovistos de vegetación, con numerosas cárcavas y graves problemas de erosión.

Por otro lado, el conjunto de condiciones a las que son sometidas las plantas durante la germinación (tratamiento pregerminativo), propagación (sustrato, endurecimiento) y trasplante (edad de las plantas, fecha y método de plantación) son de vital importancia para lograr el éxito en su establecimiento, supervivencia y crecimiento. El desempeño de las plantas (altura, diámetro, cobertura y número de ramas) independientemente de si las plantas fueron inoculadas o no, fue superior a las de la reforestación convencional.

Lo más sobresaliente del presente ensayo fue que las plantas inoculadas, presentaron un porcentaje de supervivencia mayor, seguidas de las plantas no inoculadas pero propagadas bajo las mismas condiciones que las primeras y muy por debajo los pinos de la reforestación convencional. *Pinus pseudostrobus* inoculado con *Pisolithus tinctorius* tiene potencial para reforestar sitios severamente degradados con problemas de erosión y formación de cárcavas, como es el caso en este sitio de estudio. El conjunto de estrategias representan un gran potencial de restauración ecológica y, si las tasas de crecimiento a mediano plazo fueran satisfactorias, también para el establecimiento de plantaciones con fines de producción.

REFERENCIAS

Alguacil, M.M., F. Caravaca, R. Azcón, J. Pera, G. Díaz y A. Roldán. 2003. Improvements in soil quality and performance of mycorrhizal *Cistus albus* L. seedlings resulting from addition of microbially treated sugar beet residue to a degraded semiarid Meditarranean soil. Soil Use and Management 19:277-283.

Álvarez, J.F. 2009. Ecología de micorrizas arbusculares y restauración de ecosistemas. Las prensas de ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 360 p.

Ambríz, E., A.L Báez-Pérez, J.M. Sánchez-Yáñez, P. Moutoglis y J. Villegas.2010.*Fraxinus-Glomus-Pisolithus symbiosis*: Plant growth and soil aggregation effects. Pedobiología 53:369-373.

Arias, H. 1992. Evaluación de la reforestación sobre tepetates en la zona oriente de la cuenca de México. Tierra. Número especial: Suelos volcánicos endurecidos. México. 10:309-317.

Barroetaveña, C., V.N. Bassani y M. Rajchenberg. 2012. Inoculación micorrícica de *Pinus ponderosa* en la Patagonia Argentina: colonización de las raíces, descripción de morfotipos y crecimiento de las plántulas en vivero. Bosque 33(2):163-169.

Cetina-Alcalá, V., V. González-Hernández y J. Vargas-Hernández. 1999. Manejo en vivero de *Pinus greggii* Engelm. y la calidad de planta. Agrociencia 33(4):423-430.

Choi, D.S., A.M. Quoreshi, Y. Maruyama, H.O. Jin y T. Koike. 2005. Effect of ectomycorrhizal infection on growth and photosynthetic characteristics of *Pinus densiflora* seedlings grown under elevated CO_2 concentrations. Photosynthetica 43 (2):223-229.

COFOM (Comisión Forestal del Estado de Michoacán). 2001. Atlas Forestal del Estado de Michoacán. Morelia, Michoacán, México, 97 p.

Conabio (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). Gobierno del Estado de Michoacán, SUMA (Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente) y UMSNH (Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo). 2005. La Biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado. 266 p.

Conafor (Comisión Nacional Forestal). 2006. *Pinus pseudostrobus* http://www.conafor.gob.mx/programas_nacionales_forestales/pronare/Fichas%20Tecnicas/Pinus%20pseudostrobus.pdf.

Carrera-Nieva, A. y G.F. López-Ríos. 2004. Manejo y evaluación de ectomicorrizas en especies forestales. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 10(2):93-98.

Covaleda, O.S. 2008. Influencia de diferentes impactos antrópicos en la dinámica del carbono y la fertilidad de suelos volcánicos mexicanos, implicaciones sobre el secuestro de carbono. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Departamento de Ciencias Agroforestales. Universidad de Valladolid. Palencia, España. 367 p.

Cruz de León, J. 1991. Untersuchung des technologischen Gebrauchswertes der mexikanischen Kiefernart *Pinus pseudostrobus* Lindley. Göttinger Beiträge Zur Land – und Forstwirtschaft in den Tropen und Subtropen 66:1-185.

Domínguez-Caballero, P.A., J.J. Navar-Chaidez y J.A. Loera-Ortiz. 2001. Comparación del rendimiento de pinos en la reforestación de sitios marginales en Nuevo León. Madera y Bosques 7(1):27-35.

Duvert, C., N. Gratiot, O. Evrard, O. Navratil, J. Némery, C. Prat y M. Esteves. 2010. Drivers of erosion and suspended sediment transport in three headwater catchments of the Mexican Central Highlands. Geomorphology 123:243-256.

Eguiluz, T. 1978. Ensayo de integración de conocimientos sobre el género *Pinus* en México. Tesis de Licenciatura para obtener el título de Ingeniero Agrónomo. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México.

FAO-ISRIC. 2006. World reference base for soil resources. A framework for international classification correlation and communication. 125 p.

García-Frapolli, E. y R. Lindig-Cisneros. 2011. Barreras e incentivos económicos para la restauración de la biodiversidad. Acta Biológica Colombiana 16:269-280.

García-Rodríguez, J.L., J. Pérez-Moreno, A. Aldrete, V.M. Cetina-Alcalá, y H. Vaquera-Huerta. 2009. Caracterización del hongo silvestre ectomicorrízico *Pisolithus tinctorius* (Pers.) Coker *et* Couch en cultivo y en simbiosis con eucalipto y pino. Agrociencia 40:665-676.

Haselwandter, K. 1997. Soil micro-organisms, mycorrhiza and restoration ecology. *In*: K.M. Urbanska, N.R. Webb y P.J. Edwards, eds. Restoration ecology and sustainable development. Cambridge University Press. Reino Unido. p:65-80.

Hurlbert, S.H. 1984. Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. Ecological Monographs 54(2):187-211.

Lindig-Cisneros, R., A. Blanco-García y C. Sáenz-Romero. 2005. Estrategias para la restauración ecológica de bosques. Biológicas 7:13-21.

Martínez, R.E. 1996. La restauración ecológica. Ciencias. 43:56-61.

Montoya, F. 2000. Mejoramiento de la productividad de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden, al primer año de establecimiento a través del riego y fertilización en un suelo rojo arcilloso del valle central de la VIII región. Tesis de licenciatura para la obtención del título de Ingeniero Forestal. Universidad Católica de Temuco. Escuela de Ciencias Forestales. Temuco, Chile. 60 p.

Nienstaedt, H. 1994. Reforestación en México con semilla mejorada. Boletín Mendel Sociedad Mexicana de Genética. 3(1):3-6.

Pera, J. y J. Parladé. 2005. Inoculación controlada con hongos ectomicorrícicos en la producción de planta destinada a repoblaciones forestales: estado actual en España. Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales 14(3):419-433.

Pérez-Moreno, J. y D. Read. 2004. Los hongos ectomicorrízicos, lazos vivientes que conectan y nutren a los árboles en la naturaleza. Interciencia 29:239-247.

Prince, T.D., N.E. Zimmermann, P. Van Der, M.J. Lexermeer, P. Leadley, I.T. Jorristsma, J. Schaber, D.F. Clark, P. Lasch, S. Mcnulty, J. Wu y B. Smith. 2001. Regeneration in gap models:

Priority issues for studying forest responses to climate change. Climatic Change 3-4(51):475-508.

R Development Core Team. 2011. R: *A* Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. URL: http://www.R-project.org.

Requena, N., E. Pérez-Solís, C. Azcón-Aguilar, P. Jeffries y J.M. Barea. 2001. Management of indigenous plant-microbe symbioses aids restoration of desertified ecosystems. Applied and Environmental Microbiology 67:495-498.

Sáenz-Romero, C. y A. Martínez-Palacios. 2000. Variación genética altitudinal de pinos. Nuestro Bosque 1(2):10-11.

Sáenz-Romero, C. y R. Lindig-Cisneros. 2004. Evaluación y propuestas para el programa de reforestación en Michoacán, México. Ciencia Nicolaita 37:107-122.

Smith, A.E. y D.J. Read. 2000. Mycorrhizal Symbiosis. 2a. ed. Academic Press. Londres. 605 p.

Valdés, M., E. Ambriz, A. Camacho y A. M. Fierros. 2010. Inoculación de plántulas de pinos con diferentes hongos e identificación visual de la ectomicorriza. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 2(1):53-64.

Manuscrito recibido el 22 de junio de 2012.
Aceptado el 29 de mayo de 2013.

Este documento se debe citar como:
Gómez-Romero, M., J. Villegas, C. Sáenz-Romero y R. Lindig-Cisneros. 2013. Efecto de la micorrización en el establecimiento de *Pinus pseudostrobus* en cárcavas. Madera y Bosques 19(3):51-63.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Tableros de partículas fabricados con residuos industriales de madera de *Pinus patula*

Particle boards manufactured from industrial residues of *Pinus patula* wood

Luis Zambrano,[1] Pablo Moreno,[2*] Freddy Muñoz,[3] Jorge Durán,[2] Darío Garay[2] y Styles Valero[2]

RESUMEN

Este estudio es una propuesta para dar un aprovechamiento y uso a los residuos industriales del aserrío de la madera de *Pinus patula* para la elaboración de tableros aglomerados de partículas. Por lo tanto, los objetivos fueron manufacturar tableros aglomerados de partículas homogéneos a dos niveles de densidad, determinar sus propiedades físico-mecánicas y evaluar los resultados bajo las normas alemana y venezolana. La absorción de agua promedio a 2 y 24 horas de los tableros a ambas densidades cumplió con lo estipulado en las normas. La variación del espesor (hinchamiento) promedio por inmersión en agua a 2 y 24 horas para los tableros con densidad de 767 kg m^{-3} cumplió con lo exigido en ambas normas. Para el caso de los tableros con densidad de 672 kg m^{-3} la variación de espesor a 24 horas cumplió con las normas, mientras que la variación del espesor a 2 horas no. Respecto de las propiedades mecánicas, tanto el módulo de ruptura en flexión estática como la tensión perpendicular (adhesión interna) para ambos niveles de densidad superaron el valor mínimo aceptado en las normas; demostrando que los residuos industriales de la madera de *P. patula* presentan buenas características tecnológicas para la fabricación de tableros de partículas de densidad media.

PALABRAS CLAVE
Flexión estática, densidad, propiedades físico-mecánicas, tableros de partículas de densidad media, tensión perpendicular, urea-formaldehído.

ABSTRACT

This study is a proposal to generate uses of industrial residues from sawmills of *Pinus patula* wood for the manufacturing of particleboards. The aims are to manufacture homogeneous particleboards with two density levels, determine their physical and mechanical properties and evaluate the results with German and Venezuelan standards. The average water absorption at 2 and 24 hours of both density levels of boards meets the requirements for both standards. The average thickness variation (swelling) by immersion en water at 2 and 24 hours for boards with average density of 767 kg m^{-3} meets the requirements for both standards. For the case of the panels with average density of 672 kg m^{-3} thickness variation at 24 hours meets the requirements of both standards, while the swelling at 2

1 Instituto Universitario de Tecnología de Administración Industrial. Maracay-Venezuela. C.e.: luiz.contreras@hotmail.com
2 Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Laboratorio Nacional de Productos Forestales. Mérida-Venezuela. C.e.: jorduran@ula.ve, dargaray@ula.ve, styles@ula.ve
3 Tecnológico de Costa Rica (TEC). Escuela de Ingeniería Forestal. Centro de Investigación en Integración Bosque-Industria (CIIBI). Cartago-Costa Rica. C.e.: fmunoz@tec.ac.cr
* Autor para correspondencia: C.e.: pmoreno@ula.ve

hours does not. Regarding the mechanical properties both the modulus of rupture in static bending and tension perpendicular (internal bond) for both real density levels exceed the minimum accepted by standards, demonstrating that industrial residues from *P. patula* wood exhibit good technological characteristics for medium density particleboards manufacture.

KEY WORDS
Static bending, density, physical and mechanical properties, medium density particleboard, perpendicular tension, urea-formaldehyde.

INTRODUCCIÓN

Para un buen desarrollo de la industria forestal y maderera venezolana es imprescindible el aprovechamiento integral de la madera, optimizando el rendimiento de los recursos maderables, es decir, utilizando en los procesos productivos el mayor porcentaje posible de la madera cosechada del bosque. Tradicionalmente, en Venezuela se aprovechan solamente las trozas provenientes del fuste principal hasta una altura comercial aproximada de 15 m, lo cual implica la pérdida de un volumen considerable de madera que incluye trozas de altura superior, copa y ramas. De igual manera, los residuos producidos por el procesamiento primario en las industrias madereras no son aprovechados, generando un volumen considerable de subproductos de material lignocelulósico, que particularmente en Venezuela no han sido aprovechados, debido a la existencia de recursos maderables abundantes y falta de políticas de aprovechamiento integral de los subproductos generados del procesamiento forestal industrial. Sin embargo, estos subproductos pueden ser utilizados en la fabricación de otros productos de ingeniería con múltiples aplicaciones.

Según lo señalan Alma *et al.*, (2004), la población del mundo consume actualmente más de 3,5 millones de toneladas de madera verde al año. Si la tasa de consumo de fibra de madera y la tasa de crecimiento de la población (de aproximadamente 90 millones de personas por año) se mantienen constantes, la demanda de fibra de madera se incrementará en más de 60 millones de toneladas cada año, lo que podría aumentar la tasa de deforestación (Zheng *et al.,* 2006), propiciando el agotamiento de algunas especies forestales de bosque natural. Aprovechar de manera óptima e integral el recurso forestal, los residuos industriales, las especies de rápido crecimiento y las fibras no leñosas, como los residuos agrícolas (bagazo y paja de trigo), es una buena opción para mitigar y disminuir presiones políticas y sociales, sobre la explotación de maderas procedentes de bosque natural (Latibari y Roohnia, 2010).

Un producto de ingeniería que se adapta a los requerimientos anteriormente mencionados son los tableros de partículas, pues el suministro de materia prima para su elaboración potencia el uso de subproductos originados por las operaciones forestales (podas y raleos) hasta los del proceso primario y secundario de la madera (despuntes, descuadres, costaneras, corteza, entre otros). De esta manera se generan nuevas alternativas para promover el desarrollo de la industria maderera venezolana con nuevos productos de ingeniería con diferentes aplicaciones.

Existen diversos antecedentes bibliográficos referidos al uso exitoso de residuos provenientes de la industria forestal y maderera en la elaboración de tableros aglomerados de partículas, como ejemplo están las investigaciones realizadas por (Ginzel y Peraza, 1966; Moslemi, 1974; Peredo y Deppe, 1984; Suchsland y Xu, 1989; Poblete y Sánchez, 1991; Peredo y Torres, 1991; Van Niekerk y Pizzi, 1994; Blanchet *et al.,* 2000; Moreno *et al.*, 2005; Pedieu *et al.,* 2008; Latibari y Roohnia,

2010; Bazyar *et al.,* 2011). Por otro lado, Garay *et al.* (2009), estiman que las propiedades de un tablero están determinadas por los siguientes factores: tipo, tamaño, distribución y orientación de las partículas, así como también el tipo y la calidad del proceso, contenido de humedad durante el prensado y tratamiento post-manufactura del tablero.

El presente estudio es una propuesta sobre el aprovechamiento y uso de los residuos industriales del aserrío de la madera de *P. patula* para la elaboración de tableros aglomerados de partículas.

OBJETIVOS

Los objetivos fueron: *a)* manufacturar tableros aglomerados de partículas homogéneos a dos niveles de densidad, *b)* determinar sus propiedades físico-mecánicas y *c)* evaluar los resultados de acuerdo con lo establecido en la norma alemana DIN (1981) y venezolana COVENIN (1991).

MATERIALES Y MÉTODOS

Como materia prima se utilizaron costaneras derivadas del proceso de aserrío de árboles de *P. patula* de 25 años de edad, procedentes del bosque La Carbonera-San Eusebio, Mérida-Venezuela. La elaboración de los tableros, la preparación de probetas y la ejecución de los ensayos, se realizaron en el Laboratorio Nacional de Productos Forestales: Sección tableros aglomerados de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de Los Andes, Venezuela.

Determinación de la densidad y contenido de humedad de la materia prima

De los segmentos de costaneras seleccionadas al azar, se prepararon 30 probetas con dimensiones de 30 mm x 30 mm x 100 mm para la determinación de la densidad en la condición verde, seca al aire y seca al horno, según la norma DIN (1976). El cálculo del contenido de humedad se realizó con la siguiente ecuación:

$$\%CH = \left(\frac{P_i - P_o}{P_o} \right) \cdot 100 \qquad (1)$$

donde:

% CH = contenido de humedad.
p_i= peso inicial de la muestra (g).
p_o= peso de la muestra secada al horno (g).

Viruteado de los residuos de *P. patula* y secado de partículas

Las costaneras fueron procesadas en una viruteadora de cuchillos para obtener partículas con una dimensión promedio de 20 mm de longitud, ancho variable y espesor de 0,25 mm. Desde la viruteadora las partículas fueron transferidas por un sistema neumático de ciclones a la secadora de suspensión Keller, donde fueron secadas a un contenido de humedad final de 4%.

Coeficiente de esbeltez

De manera aleatoria se tomaron 30 g de las partículas secas para determinar su geometría y tamaño, éstas se clasificaron de manera visual en tres categorías de tamaño: grandes, medianas y pequeñas. Cada categoría fue pesada y se tomaron 30 muestras de cada una. Con un vernier digital de 0,02 mm (0,0001 pulgadas) de resolución, se midió largo, ancho y espesor de las partículas y se determinó su coeficiente de esbeltez (*E*), con la ecuación (2). La proporción de participación de cada categoría de tamaño de partícula para conformar el tablero, se determinó mediante su peso.

$$E = \left(\frac{L}{e}\right) \quad (2)$$

donde:

E= coeficiente de esbeltez.
L= longitud de las partículas (mm).
e= espesor de las partículas (mm).

Componentes para la fabricación de los tableros

Se utilizaron los siguientes insumos: partículas de *P. patula* a 4% de contenido de humedad, adhesivo urea formaldehído (UF) a 60% de sólidos con viscosidad = 250 cP, pH = 8,5 y como catalizador una solución de sulfato de amonio al 30% (p/p) de concentración, la cantidad de catalizador corresponde al 8% (p/p) de la cantidad de adhesivo aplicada a cada tablero. Se fabricaron cinco tableros homogéneos para cada nivel de densidad.

Encolado de las partículas

El encolado de las partículas secas a 4% se realizó por el método de aspersión a 0,203 MPa (2 atm) por un tiempo de 8 minutos en una encoladora Drais usando una carga de adhesivo UF catalizado de 12 % respecto al peso seco de las partículas.

Formación del colchón, proceso de pre-prensado y prensado del tablero de partículas

Luego de encoladas las partículas fueron distribuidas, manualmente, sobre una lámina de aluminio previamente parafinada y humectada con agua. Para retener las partículas en todos los costados del colchón se utilizó un marco o formaleta de madera. Una vez conformado el colchón de partículas se aplicó una carga de aproximadamente 785 N (80 kg) a temperatura ambiente con la finalidad de compactar y disminuir el espesor, evitando la deformación del tablero en el proceso de prensado. Finalmente, para obtener los dos niveles de densidad en los tableros de partículas se aplicaron los respectivos ciclos de prensado (Fig. 1) en una prensa Becker van Huller bajo las siguientes condiciones operacionales: presión específica sobre el tablero: 3,05 MPa (31,14 kg cm^{-2}), presión manométrica de la prensa simple: 14,71 MPa (150 kg cm^{-2}), temperatura de los platos de la prensa: 180 ºC a 200 ºC, tiempo de prensado total: 9 min para densidad teórica 650 kg m^{-3} y 18 min para densidad teórica 750 kg m^{-3}.

Acondicionamiento y dimensionado de los tableros

Los tableros fabricados fueron almacenados en un cuarto de acondicionamiento a 20 ºC ± 1 ºC y una humedad relativa de 65% ± 2%. Los tableros permanecieron bajo esas condiciones hasta que alcanzaron un contenido de humedad de equilibrio de 12% aproximadamente. Luego los tableros fueron dimensionados en una sierra circular con escuadría de 500 mm x 500 mm, conservando el espesor de prensado de 19 mm.

Ensayos físicos y mecánicos de los tableros

A partir de los tableros dimensionados se obtuvieron 10 probetas para cada uno de los ensayos, según las normas DIN (1965[a, b, c, d y e]). Los ensayos físicos fueron: contenido de humedad, densidad del tablero, absorción por inmersión en agua y variación de espesor por inmersión en agua a 2 y 24 horas. Los ensayos mecánicos fueron: resistencia a flexión estática (módulo de ruptura, MOR) y tensión per-

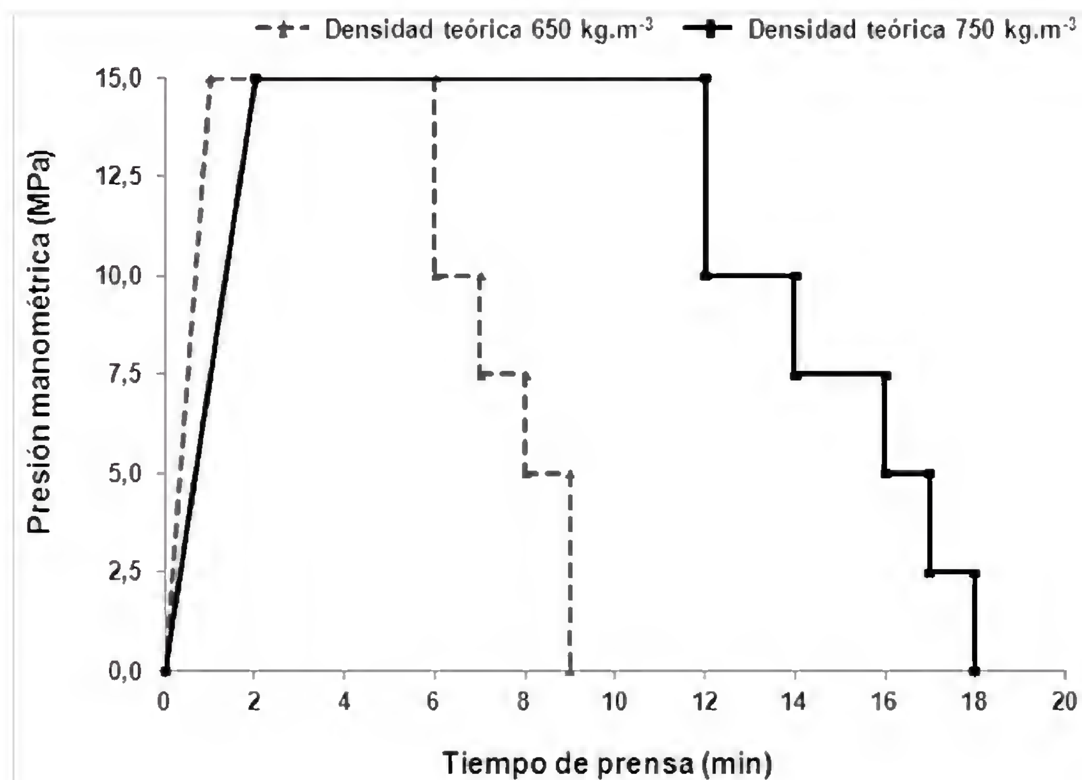


Figura 1. Diagrama del ciclo de prensado aplicado para densificar los tableros homogéneos de partículas de *Pinus patula* a las densidades teóricas propuestas.

pendicular a la superficie del tablero (adhesión interna) usando una máquina universal Instron y una velocidad de ensayo de 5 mm/min para ambos ensayos. La evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los tableros se realizó según lo estipulado por la norma venezolana COVENIN (1991) y alemana DIN (1981), utilizadas para tableros de partículas de madera de uso general con prensado plano.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño con un sólo factor (densidad) con dos niveles categóricos y seis variables respuesta (absorción de agua a 2 h y 24 h, variación de espesor o hinchamiento a 2 h y 24 h, módulo de ruptura en flexión estática y tensión paralela a la superficie del tablero).

El análisis de varianza (ANDEVA) se realizó con un nivel de confianza ∝= 0,05 y con el software estadístico Design Expert® V 8.0.

RESULTADOS

Análisis de varianza (ANDEVA) de un solo factor

El ANDEVA (Tabla 1) indica que el factor densidad del tablero es significativo para todas las variables respuesta. La probabilidad normal de residuales de los datos obtenidos en todas las variables respuesta cumple con el supuesto de normalidad, no se observaron fluctuaciones significativas de las muestras ensayadas ni datos atípicos. La proporción de variabilidad de cada parámetro respuesta es explicada por el modelo estadístico mediante el valor de R^2. Por otra parte, el valor R^2 ajustado indica que el número de factores presentes en el modelo es adecuado, por lo tanto, ambos confirman la validez del ANDEVA.

En la figura 2 se modela el efecto del factor densidad sobre las propiedades físico-mecánicas determinadas para los tableros aglomerados de *P. patula*.

Tabla 1. Valor-*p* para las variables respuesta.

Factor	*Valor-p* (α= 0,05)*					
	ABS 2h	*ABS 24h*	*VE 2h*	*VE 24h*	*MOR*	*TPST*
Modelo	< 0,0001	< 0,0001	0,0002	0,0022	< 0,0001	0,0002
Densidad	< 0,0001	< 0,0001	0,0002	0,0022	< 0,0001	0,0002
R2	0,9964	0,9881	0,8371	0,7103	0,9768	0,8347
R2 ajustado	0,9959	0,9867	0,8167	0,6741	0,9739	0,8140

FUENTE: software estadístico Design Expert® V 8.0
ABS= absorción de agua a 2 y 24 h; VE= variación de espesor a 2 y 24 h; MOR= módulo de ruptura en flexión estática; TPST= tensión perpendicular a la superficie del tablero
* Valor-*p* < 0,05 indica que los términos del modelo son significativos.
* Valor-*p* > 0,05 indica que los términos del modelo no son significativos.

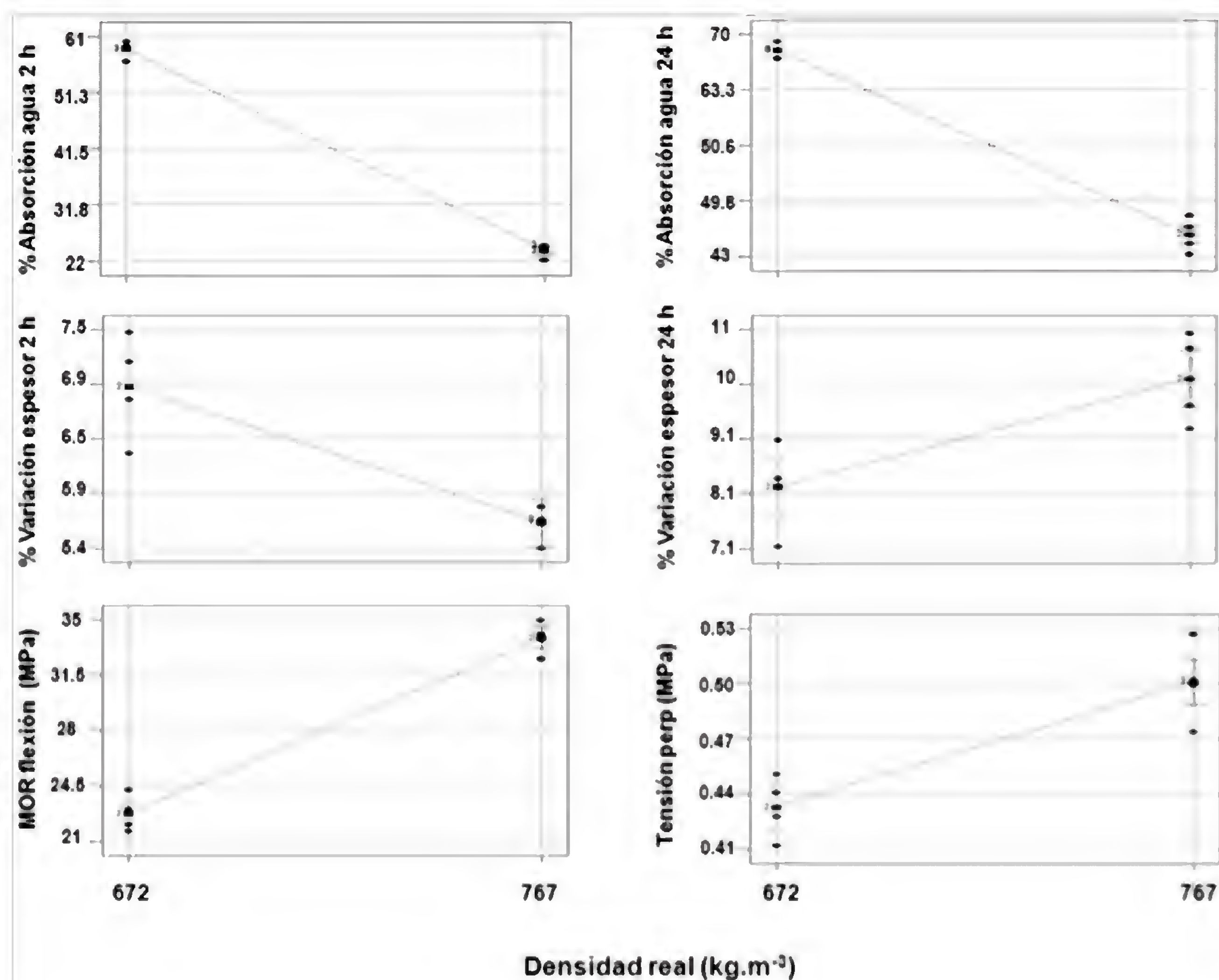


Figura 2. Modelamiento con software Design Expert® del efecto del factor densidad sobre las propiedades físico-mecánicas de los tableros homogéneos de *Pinus patula*.

Densidad de la madera de *P. patula* y tableros de partículas

Los valores de la densidad promedio obtenidos para madera sólida utilizada como materia prima para la fabricación de tableros aglomerados de partículas, se presentan en la tabla 2. Los intervalos de densidad y coeficientes de variación para los tableros se muestran en la tabla 3.

Una comparación entre la densidad teórica y la real de los tableros de partículas y madera sólida de *P. patula* se presenta en la figura 3.

Coeficiente de esbeltez

Los valores promedio de participación de cada intervalo de partículas de *P. patula* seleccionado y su respectivo coeficiente de esbeltez se muestran en la tabla 4.

El valor promedio del coeficiente de esbeltez para las partículas de *P. patula* (148,92) se encuentra dentro del intervalo de esbeltez comprendido entre 120 y 200, intervalo que es considerado por Moslemi (1974), Medina (1975), Peredo (1988), Garay (1997) y Moreno *et al.* (2002), como óptimo para la elaboración de tableros de partículas con propiedades físicas y mecánicas aceptables.

Tabla 2. Densidad promedio para la madera sólida de *Pinus patula* utilizada para la fabricación de tableros aglomerados de partículas.

Condición	*Densidad promedio (kg m^{-3})*	*Coeficiente de variación (%)*	*Contenido de humedad (%)*
Verde	684	4,4	30,50
Seca al aire	668	6,2	13,31
Seca al horno	618	5,3	-------

Tabla 3. Densidad promedio y coeficiente de variación de los tableros aglomerados de partículas de *Pinus patula.*

Densidad real promedio (kg m-3)	*Coeficiente de variación (%)*
672	3,25
767	2,88

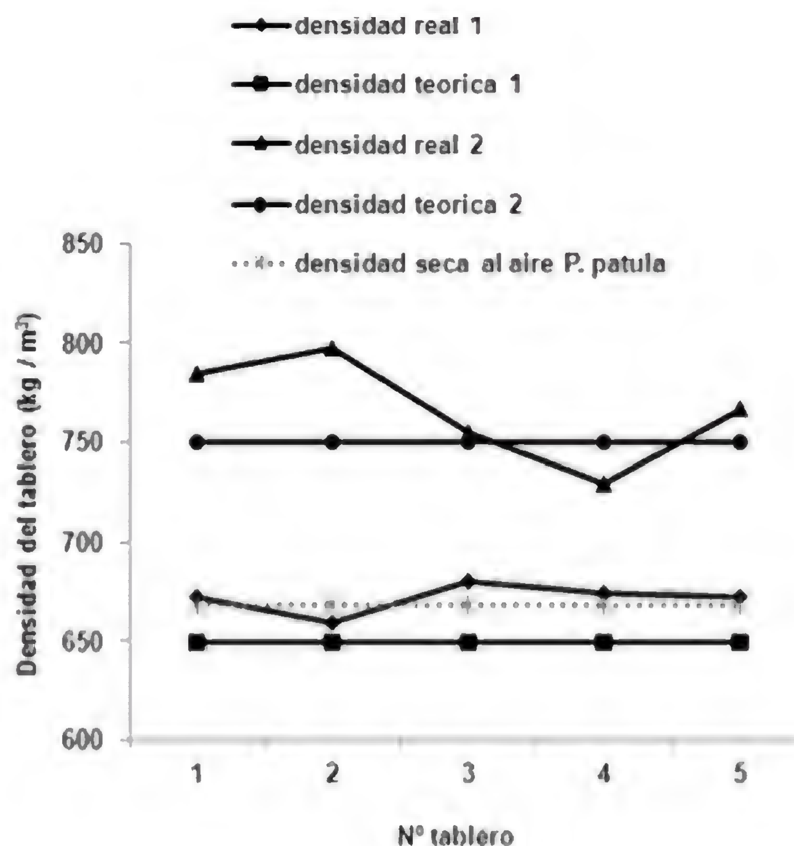


Figura 3. Comparación entre densidad teórica y real obtenida para los tableros homogéneos de partículas y la densidad de la madera sólida seca al aire de *Pinus patula*.

Tabla 4. Coeficiente de esbeltez (*E*) de las partículas de *Pinus patula.*

Rango de tamaño en ancho (mm)	*Proporción en peso (%)*	*Largo (mm)*	*Espesor (mm)*	*E*
> 18	60,00	41,07	0,23	178,56
9 – 18	27,50	29,62	0,22	134,63
< 9	12,50	29,39	0,22	133,59
Promedio	100	26,69	0,22	148,92

Absorción de agua por inmersión

En las figuras 4a y 4b, se presenta el comportamiento de la absorción de agua, por inmersión a 2 y 24 horas, de los tableros a ambas densidades y de acuerdo con la norma COVENIN (1991) que solicita 25% y 60% de absorción para 2 horas y 24 horas, respectivamente. Los tableros con densidad de 672 kg·m^{-3} y absorción de agua a 2 y 24 horas no cumplen con lo solicitado por la norma. Mientras que, los tableros con densidad de 767 kg·m^{-3} sí lo cumplen.

Variación de espesor por inmersión en agua

En las figuras 4c y 4d, se presenta el comportamiento de la variación de espesor por inmersión en agua a 2 y 24 horas de los tableros con ambas densidades y de acuerdo con las normas COVENIN (1991) y DIN (1981) que solicitan una variación no mayor a 6% y 15 % a 2 horas y 24 horas, respectivamente. Los tableros con densidad de 672 kg·m^{-3} no cumplen con la exigencia de la norma COVENIN (1991) para la variación de espesor por inmersión en agua a 2 horas, pero sí cumplen los requerimientos para la variación de espesor a 24 horas.

Los tableros con densidad de 767 kg·m^{-3} sí cumplen con lo solicitado por las normas para la variación de espesor por inmersión en agua a 2 y 24 horas.

Flexión estática (MOR)

En la figura 5a, se presentan los valores del MOR en flexión estática de los tableros de *P. patula* para ambas densidades. Los tableros con densidad de 672 kg·m^{-3} y 767 kg·m^{-3} superan en 23% y 52 %, respectivamente, al valor mínimo de 17,16 MPa (175 kg cm^{-2}) establecido por las normas COVENIN (1991) y DIN (1981).

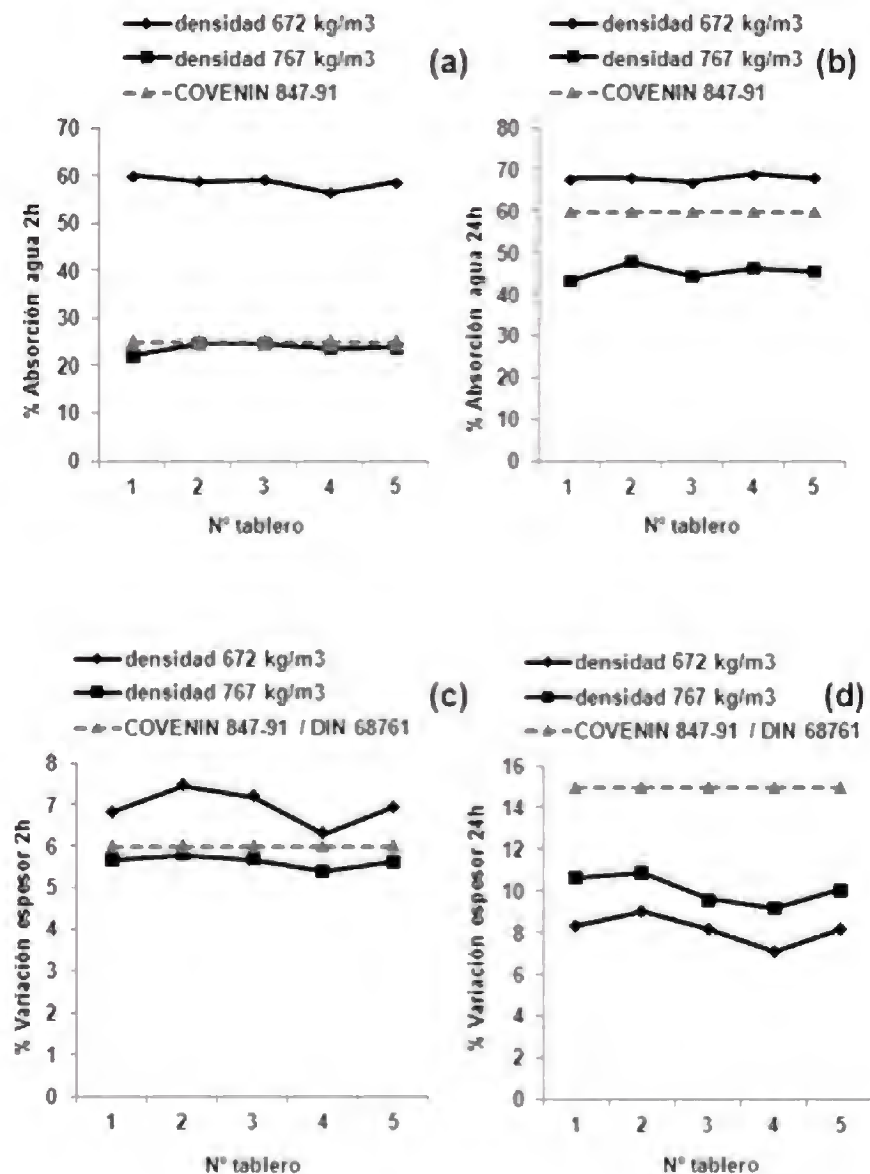


Figura 4. Absorción de agua por inmersión (a) 2 h (b) 24 h y variación de espesor o hinchamiento por inmersión en agua (c) 2 h (d) 24 h. Para tableros homogéneos de partículas de *Pinus patula.* De acuerdo a las normas COVENIN (1991) y DIN (1981).

Tensión perpendicular a la superficie del tablero

En la figura 5b se presentan los valores obtenidos para la tensión perpendicular a la superficie de los tableros de *P. patula* para ambas densidades. Los tableros con densidad de 672 kg·m^{-3} y 767 kg· m^{-3} superan en 19 % y 30 %, respectivamente, al valor mínimo de 0,34 MPa (3,5 kg cm^{-2}) solicitado por las normas COVENIN (1991) y DIN (1981).

DISCUSIÓN

El ciclo de prensado permitió obtener tableros con valores similares a la densidad de la madera seca al aire de *P. patula.* Sin embargo, aun cuando en la conformación del producto participe una sola especie, la variabilidad de la densidad dentro y entre tableros es posible, situación que menciona en su investigación Moreno *et al.* (2005) con tableros de partículas de ramas de *Fraxinus americana*. No

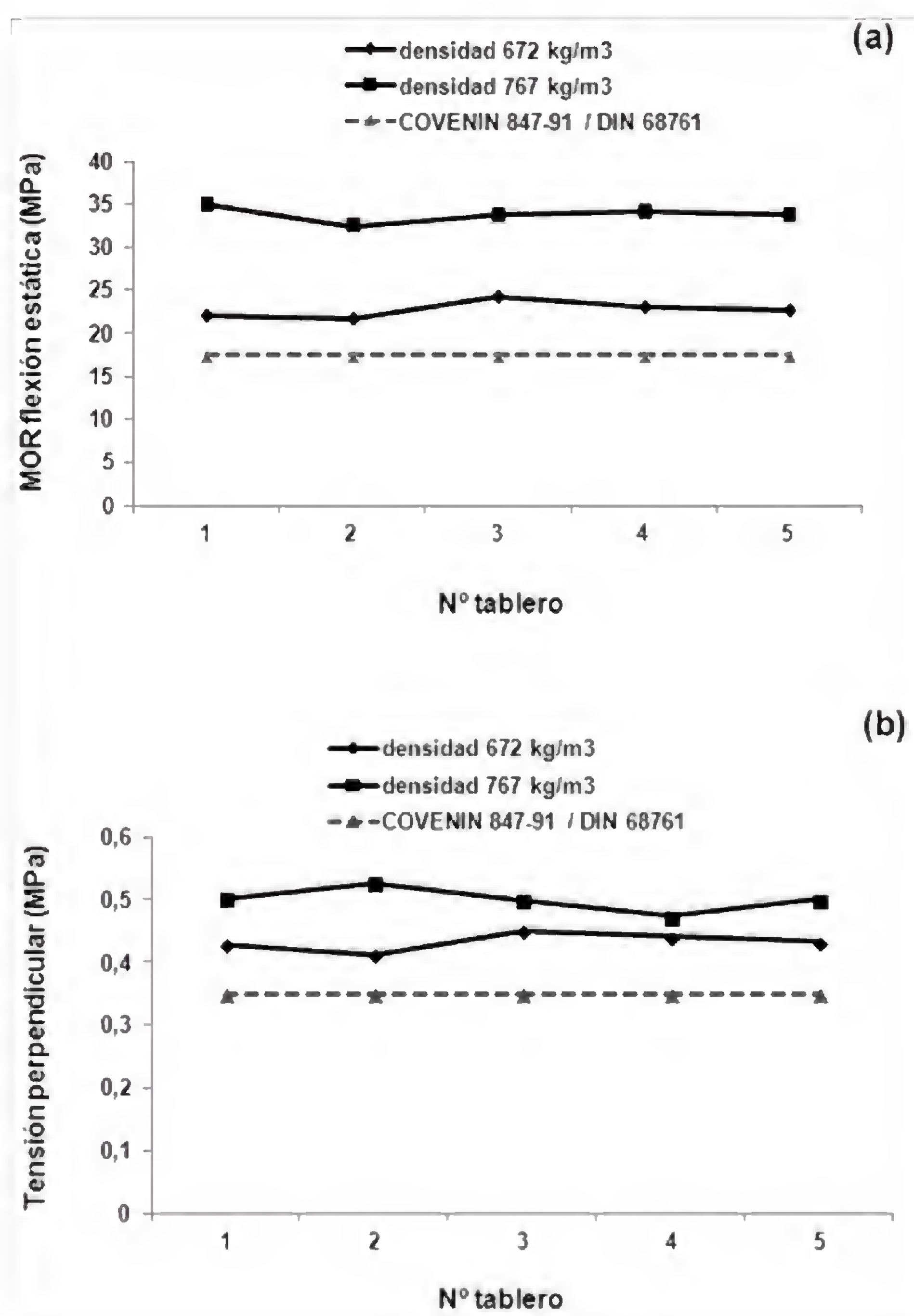


Figura 5. (a) Módulo de ruptura (MOR) promedio en flexión estática y (b) adhesión interna promedio para tableros homogéneos de partículas de *Pinus patula.* De acuerdo a normas COVENIN (1991) y DIN (1981).

obstante, los coeficientes de variación determinados para la densidad de los tableros de *P. patula* indican una buena distribución de las partículas en el producto final, de acuerdo con lo propuesto por Durán (1981).

La densidad del tablero es una medida de la compactación individual de una partícula dentro del tablero y es dependiente, principalmente, de la densidad de la madera y la presión aplicada durante el prensado (Rocha *et al.*, 1974). Un incremento en la densidad del tablero resulta en una mejor eficiencia de la resina, debido a la mejora de uniones adhesivas entre partícula y adhesivo (Gatchell *et al.,* 1966). Por ejemplo, Poblete y Peredo (1990) lograron establecer, para tableros de partículas con especies nativas chilenas, ecuaciones de regresión lineal entre la propiedad de flexión y densidad, logrando producir tableros de partículas con densidad de 650 $kg \cdot m^{-3}$ que cumplieron con el valor mínimo de 15,99 MPa (163 $kg\ cm^{-2}$) solicitado por la norma DIN (1965[c]).

De acuerdo con Rocha *et al.* (1974), la densidad de la madera de la especie influye en el consumo de adhesivo y la rugosidad superficial del tablero. El usar especies que tengan una alta densidad provoca una disminución de la resistencia mecánica del tablero ya que habría poca tasa de compresibilidad de las partículas, provocando el aumento de la expansión lineal e hinchamiento del espesor en el tablero.

Independiente del tiempo de inmersión, el incremento de la densidad del tablero produce una disminución en la absorción de agua, comportamiento que señalan (Rocha *et al.*, 1974; Durán, 1982; Poblete y Peredo, 1990; Moreno *et al.*, 2002) para tableros de partículas. Esta tendencia se debe a que una mayor densificación produce una disminución en la porosidad del tablero, menor cantidad de espacio vacío entre partículas y adhesivo, lo que impide la penetración del agua. Así lo demuestran las investigaciones de Durán (1981 y 1982); Poblete y Peredo (1990); Maloney (1993) y Moreno *et al.* (2005), quienes indican que la facilidad de absorción de agua está en función de la relación de compresibilidad del tablero, eficiencia del adhesivo y la facilidad de penetración del fluido (permeabilidad del tablero) por los espacios existentes entre partículas. Relaciones de compresibilidad bajas permiten al tablero absorber más humedad en comparación con tableros con alta tasa de compresibilidad.

Los tableros encolados con adhesivo UF no son aptos para uso a la intemperie (Peredo y Torres, 1991) una exposición prolongada a la humedad lleva a la ruptura de los enlaces que forman la adhesión entre los grupos activos de la madera (partículas) y el adhesivo (Stark *et al.,* 2010) afectando sus propiedades físico-mecánicas. Un calor excesivo también produce una degradación química del fraguado de la resina UF, por lo que, típicamente los tableros son enfriados rápidamente luego de finalizado el ciclo de prensado (Stark *et al.,* 2010).

La variación de espesor para los tableros de baja densidad se debe a la facilidad de penetración del agua en los capilares y espacios entre partículas, originando un mayor hinchamiento de la masa de partículas a este nivel de densidad. En los tableros de mayor densidad existe un mayor grado de compresibilidad, contribuyendo a disminuir el grado de higroscopicidad de las partículas de madera.

Los porcentajes de variación en espesor después de 24 horas de inmersión obtenidos para los tableros de *P. patula* son similares a los encontrados por Moreno *et al.* (2005) en tableros con partí-

culas de *F. americana* a dos niveles de densidad (600 kg·m^{-3} - 800 kg·m^{-3}) y por Guler *et al*. (2008) en tableros de partículas de *Pinus nigra* con una densidad de 700 kg· m^{-3}.

Por otra parte, los resultados aquí obtenidos para la variación de espesor a 24 horas de inmersión están en concordancia con lo que exponen Durán (1981) y Moreno *et al.* (2005 y 2010) que, a mayor densidad del tablero, mayor será el hinchamiento; pero es contario a lo mencionado por Poblete y Peredo (1990) quienes no encontraron una correlación adecuada entre hinchamiento y densidad del tablero.

Aumentar el tiempo de inmersión a 24 horas permite saturar paredes celulares que por su bajo contenido de humedad tienen capacidad de absorción produciendo un hinchamiento en las partículas, manifestándose finalmente en la variación del espesor del tablero. Como se ha mencionado anteriormente existe variación de la densidad dentro del tablero, por lo que el hinchamiento del tablero tampoco será uniforme, es decir, el tablero se deforma y pierde estabilidad dimensional.

El hinchamiento del espesor está directamente afectado por muchas variables de proceso, pero las interacciones entre las variables pueden cambiar este comportamiento, por ejemplo, la durabilidad del tablero depende de hinchamientos bajos siendo una práctica aplicar un alto contenido de resina adhesiva para controlar el hinchamiento del tablero. Sin embargo, Halligan (1970), menciona que varias investigaciones sobre la eficiencia de los tratamientos para el control del hinchamiento han dado resultados contradictorios y propone que un vaporizado post-tratamiento parece ser una opción prometedora. Al respecto, Peredo y Torres (1991), indican en su investigación que la aplicación de agentes hidrófobos reduce el efecto negativo de la humedad sobre la resina UF, disminuyendo significativamente la absorción de humedad e hinchamiento del tablero de partículas y en consecuencia mejorando las propiedades mecánicas del mismo.

Gatchell *et al.* (1966), así como Roffael y Rauch (1972), exponen que incrementando la densidad del tablero podrían esperarse mayores hinchamientos; sin embargo, de acuerdo con Lehmann (1960), el beneficio de obtener aumento de la resistencia mecánica es razón suficiente para compensar la tendencia de hinchamiento.

El módulo de ruptura es aceptado como una medida de esfuerzo y representa la carga máxima de un miembro que sometido a flexión llega a su fractura (Cai y Ross, 2010). Sin embargo, la resistencia al esfuerzo en flexión debe ser considera hasta el límite elástico, para efectos de seguridad (McNatt, 1973). Mientras que, la adhesión interna o tensión perpendicular determina la resistencia del tablero a la delaminación o separación de sus capas (Cai y Ross, 2010).

El MOR en flexión estática se incrementa a mayor densidad del tablero, esto se debe entre otros factores a una mayor eficiencia en la distribución de la resina y a un mejor contacto entre partículas-adhesivo, así como también a una mayor densificación de las partículas (mayor razón de compresibilidad), disminuyendo el volumen de espacios vacíos. Esto conlleva a que el tablero de mayor densidad trasmita los esfuerzos de partícula a partícula de manera más uniforme traduciéndolos en un aumento de la resistencia mecánica (Durán, 1981; Maloney, 1993 y Bazyar *et al.*, 2011).

En general, el MOR en flexión obtenido en este estudio con los tableros de

ambas densidades (Fig. 5a) supera al intervalo de MOR de 15,20 MPa - 21,97 MPa (155 kg cm^{-2} – 224 kg cm^{-2}) encontrado por Cai y Ross (2010) para tableros de partículas tipo industrial con densidad de 690 kg m^{-3}.

En cuanto a la tensión perpendicular a la superficie del tablero (TPST), aumenta a medida que se incrementa la densidad del tablero y la relación de compresibilidad. Esto se puede atribuir al mayor contacto relativo entre las partículas y la mayor eficiencia de la resina, así como también a que se logra una densificación mayor en el centro del tablero debido al mayor volumen de partículas a ser prensadas. Por lo tanto, el gradiente de densidad en el espesor del tablero es menos variable que en el caso de los tableros de menor densidad (Durán, 1982; Maloney, 1993 y Moreno *et al.*, 2002).

En general, la adhesión interna obtenida en este estudio con los tableros de ambas densidades está dentro de los intervalos mencionados por Cai y Ross (2010), de 0,314 MPa - 1,177 MPa (3,2 kg cm^{-2} – 12,0 kg cm^{-2}) para tableros de partículas de tipo industrial con densidad de 690 kg·m^{-3}, y el intervalo de 0,314 MPa - 0,490 MPa (3,2 kg cm^{-2} – 5,0 kg cm^{-2}) encontrado por Guler *et al.* (2008) para tableros de partículas con una densidad de 700 kg m^{-3} fabricados con residuos de *Pinus nigra*.

Finalmente, el modelamiento con el software estadístico Design Expert con una confiabilidad de 95% indica que, a mayor densidad, disminuye la absorción de humedad a ambos tiempos de inmersión, aumenta el hinchamiento o variación del espesor a 24 horas de inmersión. Los esfuerzos en flexión estática y tensión perpendicular (adhesión interna) también aumentan. Estos resultados son coincidentes con lo presentado en las figuras 4 y 5.

CONCLUSIONES

Como se demostró en el análisis de varianza y en los resultados obtenidos, la densidad del tablero es un factor que influye de manera directa sobre las propiedades físico-mecánicas de un tablero aglomerado de partículas.

El aprovechamiento de los residuos industriales de la especie *Pinus patula*, mostró buenos resultados y propiedades tecnológicas adecuadas para su trasformación en un producto de ingeniería como el tablero homogéneo de una capa de partículas con densidad media. Los tableros de este estudio cumplieron con los valores mínimos solicitados por las normas, en particular, para las propiedades mecánicas de MOR y adhesión interna. Sin embargo, los porcentajes de absorción de humedad y variación de espesor en algunos casos no cumplieron con los valores mínimos aceptados por norma.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el tablero homogéneo de partículas de *P. patula* con una densidad de 767 kg·m^{-3} presentó las mejores características en cuanto a propiedades mecánicas de MOR, adhesión interna y mejor comportamiento en la absorción de humedad a 2 y 24 horas y variación de espesor a 2 horas.

Finalmente, los tableros aglomerados de partículas de *P. patula* homogéneos de una capa, encolados con urea-formaldehído y de ambas densidades poseen buena resistencia mecánica y adhesión interna, por lo que se recomienda su uso en partes internas de muebles y gabinetes, como material decorativo superpuesto sobre otros materiales, como recubrimiento interno de casas prefabricadas, entre otros usos; siempre y cuando el tablero preste su servicio en sitios con poca o nula exposición directa a la humedad.

REFERENCIAS

Alma, M., H. Kalaycroglu, I. Bektas y A. Tutus. 2004. Properties of cotton carpel based particleboards. Industrial Crops and Products 2:141-149.

Blanchet, P., A. Cloutier y B. Rield, B. 2000. Particleboard made from hammer milled black spruce bark residues. Wood Science and Technology 34(1):11-19.

Bazyar, B., A. Tichi y H. Rangavar. 2011. Particleboard made from fast growing Aspen wood and old rail road ties. Australian Journal of Basic and Applied Sciences 5(8):548-553.

Cai, Z y R. Ross. 2010. Mechanical properties of wood-based composite materials. *In*: R. J. Ross, ed. Wood handbook-Wood as an engineering material. Centennial edition. General Technical Report FPL-GTR-190. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin, EUA. 12 p.

COVENIN (Comisión Venezolana de Normas Industriales). 1991. Norma venezolana para tableros de partículas de madera (provisional) COVENIN-847-91. Ministerio de Fomento. Caracas-Venezuela.

DIN (Deutsches Institut fur Normung). 1965a. Testing of wood chipboards; general requirements, sampling, evaluation. German National Standard. Standard DIN 52360.

DIN (Deutsches Institut fur Normung). 1965b. Testing of wood chipboards; determination of dimensions, raw density and moisture content. German National Standard. Standard DIN 52361. 2p.

DIN (Deutsches Institut fur Normung). 1965c. Testing of wood chipboards; bending test, determination of bending strength. German National Standard. Standard DIN 52362. 2p.

DIN (Deutsches Institut fur Normung). 1965d. Testing of wood chipboards; determination of variation in thickness due to moisture. German National Standard. Standard DIN 52364. 1 p.

DIN (Deutsches Institut fur Normung). 1965e. Testing of wood chipboards; determination of tensile strength vertical to the chipboard plane. German National Standard. Standard DIN 52365. 1 p.

DIN (Deutsches Institut fur Normung). 1976. Testing of wood; determination of density. German National Standard. Standard DIN 52182. 3 p.

DIN (Deutsches Institut fur Normung). 1981. Particle boards; flat pressed boards for general purposes; FPO-board. German National Standard. Standard DIN 68761.

Durán, J. 1981. Utilización de los aclareos de las especies de la plantación de Caparo para tableros aglomerados de partículas: Parte I, Teca. Universidad de Los Andes, Laboratorio Nacional de Productos Forestales. Mérida, Venezuela. 77 p.

Durán, J. 1982. Utilización de los aclareos de las especies de la plantación de Caparo para tableros aglomerados de partículas: Parte II, Gmelina. Universidad de Los Andes, Laboratorio Nacional de Productos Forestales. Mérida, Venezuela. 44 p.

Garay, D. 1997. Tableros aglomerados de partículas. Laboratorio Nacional de

Productos Forestales, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

Garay, M., F. MacDonald, M. Acevedo, B. Calderón y J. Araya. 2009. Particleboard made with crop residues mixed with wood from *Pinus radiata.* BioResources 4(4):1396-1408.

Gatchell, G., B. Heebink y F. Hefty. 1966. Influence of component variables on the properties of particleboard for exterior use. Forest Products Journal 16(4):46-59.

Ginzel, C y W. Peraza. 1966. Tecnología de tableros de partículas. Instituto de Investigación y Experiencias. Madrid. 185 p.

Guler, C., Y. Copur y C. Tascioglu. 2008. The manufacture of particleboard using mixture of peanut hull (*Arachis hypoqaeae L.*) and European black pine (*Pinus nigra* Arnold) wood chip. Bioresource Technology 99(8): 2893-2897.

Halligan, A. 1970. A review of thickness swelling in particleboard. Wood Science and Technology 4(4):301-312.

Latibari, A y M. Roohnia. 2010. Potential of utilization of the residues from Poplar plantation for particleboard production in Iran. Journal of Forestry Research 21(4):503-508.

Lehmann, F. 1960. The effects of moisture content, board density and press temperature on the dimensional and strength properties of flat-pressed flakeboard. School Forestry, North Carolina State Univ., Raleigh, N.C. 106 pp.

Maloney, T. 1993. Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing. Miller Freeman Inc., San Francisco, California, EUA. 686 p.

McNatt, J. 1973. Basic engineering properties of particleboard. Res. Pap. FPL–206. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 14 p.

Medina, A. 1975. Seminario sobre proceso de fabricación de tableros de partículas de madera. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela.

Moreno, P., J. Durán, y D. Garay. 2002. Efecto de las Sales CCA sobre las propiedades físicas y mecánicas en tableros de partículas de pino caribe. Revista Forestal Latinoamericana 17 (1):1-34.

Moreno, P., J. Durán, D. Garay, S. Valero, T. Shakespeare y R. Nieto. 2005. Utilización de la madera de *Fraxinus americana* (fresno) en la fabricación de tableros de partículas. Revista Theoria 14(2):57-64.

Moreno, P., J. Durán, D. Garay y S. Valero. 2010. Utilización de tallos de *Guadua angustifolia* en la fabricación de tableros de partículas. Forest Systems 19(2):241-248.

Moslemi, A. 1974. Particleboard. Vol. I Materials. Southern Illinois University Press. 239 p.

Peredo, M y H. Deppe. 1984. Zur Verwendung von Biomasse bei der Herstellung von Holzspanplatten für das Bauwesen. Forstarchiv 55(2):65-70.

Peredo, M. 1988. Fabricación de tableros de partículas para uso exterior. Bosque (Valdivia) 9(1):35-42.

Peredo, M y E. Torres. 1991. Fabricación de tableros de partículas con desechos industriales. Bosque (Valdivia) 12(1):49-57.

Pedieu, R., B. Riedl y A. Pichette. 2008. Physical and mechanical properties of panel based on outer bark particles of white birch: mixed panels with wood particles versus wood fibres. Maderas: Ciencia y Tecnología 10(3):195-206.

Poblete, H y M. Peredo. 1990. Tableros de desechos del debobinado de especies chilenas. Bosque (Valdivia) 11(2):45-58.

Poblete, H y J. Sánchez. 1991. Tableros con corteza de *Pinus radiata.* Bosque (Valdivia) 12(1):17-26.

Rocha, B., W. Lehmann y R. Sidney. 1974. How species and board densities affect properties of exotic hardwood particleboards. Forest Product Journal 24(12):37-45.

Roffael, E y W. Rauch. 1972. Influence of density on the swelling behavior of the phenolic resin bonded particleboards. Holz als Roh-und Werkstoff 30(1):178-181.

Stark, N., Z. Cai y C. Carll. 2010. Wood-based composite materials panel products, glued-laminated timber, structural composite lumber, and wood–nonwood composite materials. *In:* R.J. Ross, ed. Wood handbook—Wood as an engineering material. Centennial edition. General Technical Report FPL-GTR-190. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin, EUA p:1-28.

Suchsland, O y H. Xu. 1989. A Simulation of the horizontal density distribution in a flake-board. Forest Products Journal 39 (5):29-33.

Van Niekerk, I y A. Pizzi. 1994. Characteristic industrial technology for exterior *Eucalyptus* particleboard. Holz als Roh-und Werkstoff 52(2):109-112.

Zheng, Y., R. Pan, B. Jenkins y S. Blunk. 2006. Properties of medium-density particleboard from saline Athel wood. Industrial Crops and Products 23(3):318-326.

Manuscrito recibido el 23 de julio de 2012.
Aceptado el 13 de junio de 2013.

Este documento se debe citar como:
Zambrano, L., P. Moreno, F. Muñoz, J. Durán, D. Garay y S. Valero. 2013. Tableros de partículas fabricados con residuos industriales de la madera *Pinus patula*. Madera y Bosques 19(3):65-80.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Opciones reales para determinar el turno óptimo en sistemas silvopastoriles: análisis de inversión

Real options for determining optimum time systems sylvopastoral: investment analysis

Gastón Milanesi,[1] Diego Ricardo Broz[2]
y Guillermo Bruno Woitschach[3]

RESUMEN

El trabajo propone analizar y valorar, desde la perspectiva económica-financiera, el momento óptimo de cosecha en un sistema silvopastoril, utilizando las Opciones Reales (OR) como herramienta para la toma de decisiones estratégicas. Ésta se basa en un proceso estocástico para la proyección de precios, mientras que el Valor Actual Neto (VAN) utiliza una tasa fija en todo el proyecto. Los resultados mediante OR indican talar a los 18 años con un VOR (Valor Opción Real) $AR 1 088 339 frente a la alternativa VAN de talar a los 11 años y $AR 511 914.

PALABRAS CLAVE
Flujo de fondos, momento óptimo, opciones reales, rejilla binomial.

ABSTRACT

In this work we assess, from an economic and financial perspective, the optimal time of timber harvest in joint forestry-pasture systems. For this we apply a Real Options (RO) approach as a tool of strategic decision making. It assumes a stochastic process of price projections and is compared with the present value (NPV) computed on the basis of a fixed rate all along the project. The results obtained by means of the RO approach recommend cutting at 18 years with a ROV (Real Options Valuation) of $AR 1 088 339 (ARG) against the alternative NPV assessment that recommends cutting at 11 years and yields $AR 511 914.

KEY WORDS
Cash flow, optimal timing, real options, binomial lattice.

1 Departamento de Ciencias de la Administración, Universidad Nacional del Su, CONICET, Bahía Blanca, Argentina. C. e.: milanesi@uns.edu.ar
2 Doctorando en Ingeniería, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, CONICET, Bahía Blanca, Argentina. C. e.: diego.broz@uns.edu.ar
3 Doctorando en Cs. de la Administración, Departamento de Cs. de la Administración, Universidad Nacional del Sur, CONICET, Bahía Blanca, Argentina. C. e.: gwoitschach@facfor.unam.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Los sistemas agroforestales o mixtos, específicamente los sistemas silvopastoriles (SSP) están teniendo auge en Argentina debido a la flexibilidad en el flujo económico, permitiendo la generación de ingresos anuales a partir del cuarto año del establecimiento; producto del componente ganadero y del ingreso final del componente forestal (Fassola *et al.*, 2004). Son varios los autores que afirman bondades del SSP. Musálem (2002) menciona que los sistemas pueden estar en zonas fértiles, como también en zonas áridas, mejorando la productividad de estas últimas; Blasco *et al.* (2005) lo plantean como una estrategia económica para combatir el vinal (*Prosopis ruscifolia*) frente a métodos tradicionales; Cerruto *et al.* (2007) plantea que los SSP permiten abatir la erosión en comparación a una pastura degradada, aportando aumento de la viabilidad financiera; para Soares *et al.* (2003) los SSP son una alternativa de diversificación de rentas y recuperación ambiental. Se concluye que los SSP tienen importancia desde el punto de vista económico y ecológico, por ello se requieren herramientas para su gestión como una manera de tomar decisiones óptimas.

En este tipo de inversiones se asocia a la maduración del proyecto con la rotación, éste es un término relacionado con el tiempo que lleva una población en ser cortada (Schneider, 2002), convirtiendo el capital en renta. El mismo autor menciona que la duración de la rotación es definida por la meta técnica de la empresa, siendo los criterios tanto económicos como biológicos. Bettinger *et al.* (2009) enumeran siete tipos de rotación: física, técnica, silvicultural, biológica, por generación de ingresos, económica-financiera y valoración del crecimiento porcentual.

En general, el método empleado para valorar activos reales es el descuento de flujo de fondos (DFF) (Copeland *et al.*, 2000; Pratt y Grabowski, 2008). No obstante, este método no incorpora en el valor los múltiples cursos de acción o flexibilidad estratégica, propios de la vida proyectada e incierta de la inversión en cuestión (Mun, 2005). Valorar la flexibilidad estratégica de una inversión se logra adaptando la Teoría de Opciones para instrumentos financieros (Black y Scholes, 1973; Merton, 1973) a problemas de inversión en activos reales, dando lugar a los modelos de Valoración de Opciones Reales (VOR) (Dixit y Pindyck, 1994; Trigeorgis, 1997). En la literatura financiera el primer modelo corresponde a valorar la opción de crecimiento (Myers, 1977), a partir de este trabajo se han desarrollado diferentes propuestas analíticas para el tratamiento de categorías específicas de opciones. A continuación se enumeran algunos trabajos seminales para cada tipo: *a)* opción de diferimiento (Mc Donald y Siegel, 1981; Paddock *et al.*, 1988); *b)* opción de crecimiento (Pindyck, 1988; Trigeorgis, 1988; Smit, 1997); *c)* opción de abandono (Myers y Majd, 1990); *d)* opciones de expandir-contraer o extensión de la vida útil (Trigeorgis y Mason, 1987); *e)* opción de cierre temporario o corte del proceso productivo (Brennan y Schwartz, 1985); *f)* opción de intercambio (Margrabe, 1978; Kulatilaka, 1988); *g)* opciones financieras de insolvencia (Mason y Merton, 1985). Si bien los clásicos modelos plantean ecuaciones en diferencia estocástica en tiempo continuo, para el análisis estratégico de activos reales se emplea el método binomial (Cox *et al.*, 1979), utilizando rejillas en lugar de árboles, dada su capacidad de recombinar nodos intermedios (Smith, 2005; Milanesi y Vigier, 2010).

En el campo forestal los pioneros en la aplicación de componentes estocásticos en cosecha fueron Malliaris y Brock (1982), Miller y Voltaire (1983), entre otros. Thomson (1992), así como Yin y Newman (1997) estudiaron el turno óptimo

de cosecha, asumiendo que los precios siguen un movimiento geométrico browniano, estos últimos autores mencionan que los enfoques tradicionales, como la Metodología de Faustmann (Grainger, 1968), se limitan a un mundo determinista.

Para Sant´Anna y Nogueira (2010), la VOR es una herramienta más realista de evaluación que el valor actual neto (VAN), ya que la tasa de descuento permanece inalterable en la vida del proyecto al realizar el análisis. El autor recalca que, en valoraciones de concesiones forestales, la VOR presenta valores significativamente mayores que VAN, esto coincide con Moreira *et al.* (2000), quien menciona que los resultados obtenidos por VOR fueron 140% superiores a los calculados por VAN y más realistas.

Soares *et al.* (2003) mencionan que la tasa de descuento afecta significativamente el VAN, siendo más rentable el proyecto cuanto menor sea la tasa. La tasa de descuento no se elabora mediante un procedimiento cuantitativo riguroso, sino mediante un análisis cualitativo integral, no riguroso o de poca consistencia, condicionado por costo de oportunidad, grado de riesgo del proyecto, costo del dinero, entre otros; afectando directamente en la toma de decisión sobre proyecto. Entre los trabajos que proponen alguna tasa encontramos a Monicault y Delvalle (2009) con una tasa de descuento de 12% obteniendo un VAN de $AR 9 357 y un turno de 12 años en el estudio de un SSP en la Provincia del Chaco, Argentina; Chidiak *et al.* (2003) plantea un estudio de factibilidad de inversiones forestales en la Patagonia con tasas de 8% a 12%, además menciona que por debajo de 8% el VAN es negativo; Colcombet *et al.* (2010) concluye que un proyecto forestal a 152 km de la industria resiste holgadamente tasas de descuento de 8% anual en la Provincia de Misiones; Fassola *et al.* (2004) mencionan Ingresos Anuales Equivalentes (IAE) mayores a $AR 500 con una tasa de 5%, siendo superior el beneficio de los SSP frente a forestación pura, invernada de novillos, maíz y soja.

En este trabajo se plantea la necesidad de aplicar el enfoque de la VOR en el ejercicio de la tala en un sistema de producción mixto forestal-ganadero, comparando cada año, a partir del décimo (madurez tecnológica) hasta el vigésimo (máximo horizonte de planificación), el valor obtenido, producto de la cosecha en los nodos de la rejilla binomial (año *t*) *versus* el valor actual neto esperado de talar en el próximo año (año *t+1*). La comparación periodo a periodo es relevante porque estos valores se caracterizan por ser cambiantes en función del tiempo y riesgo de las variables. El caso de análisis se corresponde con un escenario forestal simulado y un nivel de producción ganadera acorde con el patrimonio forestal, el cual permitirá determinar la viabilidad económica del proyecto de inversión para el noreste de la República Argentina, mediante la aplicación de la VOR y la comparación con el VAN.

OBJETIVOS

El primero objetivo de este trabajo fue la determinación de la madurez del proyecto de inversión para un sistema de producción mixto forestal-ganadero para el noreste argentino, el cual se corresponde con la determinación del turno óptimo de cosecha mediante la aplicación de OR. Como segundo objetivo se planteó la comparación de resultados entre un escenario evaluado mediante la VOR y por otro lado el VAN. Como tercer y último objetivo se planteó fundamentar el uso de la VOR como metodología de evaluación económica-financiera de un sistema de producción mixto frente al uso del VAN.

MATERIALES Y MÉTODOS

Valoración del componente forestal en el SSP

Para evaluar el proyecto de inversión, se proyectaron a partir de los años 10 y hasta un horizonte de planificación de 20 años, los ingresos y egresos de cada una de las componentes del sistema para luego aplicar la VOR y el VAN y, consecuentemente, tomar las decisiones estratégicas que generaron mayor beneficio. La evolución de la masa forestal fue obtenida mediante el software Simulador Forestal (Crechi *et al.,* 2005) y la producción ganadera (carga por hectárea) se supuso constante desde el inicio hasta el final del horizonte de planificación.

La volatilidad se estimó a partir de la serie histórica de precios correspondientes a los subproductos de la explotación forestal, considerados estos como cartera de productos y aplicando los conceptos de la Teoría Moderna de la Cartera (TMC) (Markowitz, 1991).[4] Por otro lado, para el componente ganadero se utilizó solamente la serie histórica, ya que a diferencia del forestal, existe un sólo producto comercial. Para calcular el precio promedio y la variabilidad de la mezcla de subproductos obtenidos, aplicando los conceptos de la TMC, estimando el precio medio se utilizó la ecuación (1), el riesgo del precio es determinado por la ecuación (2).

$$P_0 = \sum_{i}^{n} x_i P_i \qquad (1)$$

4 La Teoría de la Cartera (Modern Portfolio Theory) es aplicable a todo tipo de carteras de activos. En este caso, el precio promedio de la masa forestal es el promedio ponderado del promedio observado de cada subproducto. La volatilidad es representada por la suma ponderada de los desvíos observados ajustados por la covarianza (correlación) precio correspondiente a la familia de subproductos.

donde:

P_i: precio promedio de cada subproducto

x_i: participación en el total producido

P_o: precio promedio

$$\sigma_c = \sum_{i=1;j=1}^{n} x_i^2\sigma_i^2 + x_j^2\sigma_j^2 + 2(x_i x_j)\rho_{ij}\sigma_i\sigma_j \qquad (2)$$

donde:

σ_c : riesgo del precio de la cartera de productos

x_i y x_j : participaciones de cada subproducto

σ_i^2 y σ_j^2: varianzas de los precios de los subproductos

σ_i y σ_j : desvíos de los precios

ρ_{ij} : coeficiente de correlación de precios

Usando el precio promedio de la ecuación (2), se calcularon los flujos de fondos libres con la ecuación (3).

$$FF_t = [P_0 \times vol_t] \times (1 - C_t) \times (1 - I) \qquad (3)$$

donde:

FF_t : flujos de fondos libres

vol_t :producción esperada en cada periodo del horizonte de planificación obtenido mediante simulación

C_t : porcentaje que representan los costos de producción (variables y de estructura) sobre los ingresos por ventas, calculado mediante la ecuación (4).

I : tasa marginal de impuesto a las ganancias.

La tasa marginal de impuesto a las ganancias I fue de 35%.

$$C_t = \frac{c_t}{[P_0 \times vol_t]} \qquad (4)$$

$$VAN_{ft} = FF_t \times e^{-kt} \quad (5)$$

El valor intrínseco de la explotación sin flexibilidad estratégica se estimó con la ecuación (5), siendo su expresión el valor actual de los flujos de fondos derivados de la tala en cada uno de los años, descontados a la tasa ajustada por riesgo sobre inversiones equivalentes.[5] La estructura de la tasa para mercado emergente, poco diversificado y segmentado (Damodaran, 2002), surgió de ajustar el rendimiento de mercado por la volatilidad total, en este caso dada por el desvío del precio. La ecuación (6) muestra la formulación de la tasa ajustada por riesgo.

$$k = (1 + rm) \times \left(1 + \sigma_c \sqrt{\Delta t}\right) \quad (6)$$

donde:

rm : adicional por riesgo de mercado

σ_c : variación del precio

Δt : relación entre T/n, siendo esto la longitud de cada paso del modelo

k : relación porcentual

La proyección del precio de venta promedio de los subproductos forestales sigue un proceso estocástico del tipo Geométrico Browniano. Se trabajó en tiempo discreto y, para la elaboración de una rejilla binomial,[6] se utilizaron los parámetros del modelo CRR (Cox *et al.*, 1979) mediante las ecuaciones (7) y (8).

$$u = e^{\left(\sigma_c \sqrt{t}\right)} \quad (7)$$

$$d = e^{-\left(\sigma_c \sqrt{t}\right)} \quad (8)$$

Los movimientos de ascenso u y descenso d se calcularon utilizando el desvío de la cartera de precios calculado con la ecuación (2). El precio de cada nodo[7] padre P_{ij} de la rejilla en t - 1 genera los precios ascendentes i y descendentes j en t por medio de la ecuación (9).

$$P_{ij(t)} = \left\lfloor P_{i(t-1)} \times u; P_{j(t-1)} \times d \right\rfloor \quad (9)$$

Una vez proyectado el proceso estocástico del precio por medio de las ecuaciones (7) y (8), se calculó nuevamente el flujo de fondos para cada periodo t y cada nodo (i, j) mediante la ecuación (10).

$$FF_{ij(t)} = \left\lfloor P_{ij(t)} \times vol_t \right\rfloor \times (1 - C_t) \quad (10)$$

Con los flujos de fondos para cada nodo de la rejilla se construyeron las OR, para ello fue necesario definir el precio de ejercicio de la opción. La decisión a que se enfrenta el agente es seleccionar el momento de madurez de la inversión, que se corresponde con la determinación del turno óptimo de cosecha del SSP, para lo cual se debe seguir un criterio de maximización de beneficios, conjugando el factor tiempo y el riesgo que emerge de las variables precio de los subproductos. Los flujos de fondos proyectados en cada

5 La tasa por riesgo equivalente se calcula aplicando los clásicos modelos como el CAPM (*Capital Asset Pricing Model*), APM (*Arbitrage Pricing Model*); MPM (*Multifactor Pricing Model*) y sus adecuaciones a mercados emergentes.

6 Las rejillas binomiales son empleadas debido a su capacidad de recombinar nodos e incorporar las propiedades propias del triángulo de Pascal. Los árboles binomiales explicitan gráficamente el problema de manera más eficiente. No obstante, no permiten recombinar, lo que torna su cálculo computacionalmente más complejo que las rejillas. Si n representa los periodos o intervalos de tiempo, la cantidades de nodos finales de una rejilla es de $n+1$ y de nodos intermedios $n(n+1)/2$. En los árboles binomiales, en cambio, estos valores son $2n-1$ y $2n-1$, respectivamente (Smith, 2005).

7 Los nodos pueden interpretarse como posibles escenarios futuros; a mayor intervalo de tiempo mayor cantidad de nodos debido a la mayor incertidumbre. Así, para el periodo t = 1 la cantidad de nodos de la rejilla es de 2 (dos escenarios) mientras que para t = 10 la cantidad es 11.

escenario de la rejilla fueron comparados con el valor esperado del próximo año, según la expresión (11).

$$X_{t+1} = \sum_{i=1;j=1}^{n} FF_{ij(t+1)} \times q_{ij(t+1)} \qquad (11)$$

Donde X_{t+1} es el promedio de los flujos de fondos en cada nodo del próximo periodo $FF_{ij(t+1)}$ ponderado por la probabilidad asociada $q_{ij(t+1)}$, siendo las probabilidades asociadas a cada nodo dadas por la ecuación (12).

$$q_{ij(t+1)} = \frac{n!}{m!(n-m!)} \times \left[p^m \times \left(1 - p^{n-m}\right)\right] \qquad (12)$$

En este caso, los éxitos m estuvieron dados por los movimientos de ascenso (subas) del precio sobre el total de observaciones n y condicionados por los coeficientes equivalente-ciertos p, estimados con la ecuación (13).

$$p = \frac{(1+r)^{\Delta t} - d}{u - d} \qquad (13)$$

Donde r representa la tasa libre de riesgo y los movimientos (u; d), surgen de las ecuaciones (7) y (8) y Δt se definió en la ecuación (6). El valor esperado $V_{ij(t)}$ surgió de comparar en cada periodo, el valor correspondiente a cada nodo $FF_{ij(t)}$ con el valor esperado en el próximo año; $X_{t+1} \times e^{-r\Delta t}$ matemáticamente el problema se resume en la expresión (14).

$$V_{ij(t)} = \begin{cases} FF_{ij(t)}, & si\ FF_{ij(t)} > X_{t+1} \times e^{-r\Delta t} \\ 0, & si\ no \end{cases} \qquad (14)$$

El valor de la opción en el momento inicial $(t = 0)$ requiere de utilizar el procedimiento recursivo sobre la rejilla (Milanesi y Viger, 2010; Milanesi, 2011) dado en la ecuación (15).

$$V_{0t} = \sum_{i=1;j=1;t}^{n} \left\{V_{ij(t)} \times q_{ij(t)}\right\} \times e^{-r\Delta t} \qquad (15)$$

Siendo V_{0t} el valor actual de la opción de talar en el momento t. El ejercicio de la opción en cada nodo (escenario) en t se expresa por $V_{ij(t)}$. La probabilidad de alcanzar el nodo asociado es $q_{ij(t)}$. El factor de actualización desde el momento *(t)* hasta el inicio (*t* = *0*) es $e^{-r\Delta t}$.

Valoración del componente ganadero en el SSP

El análisis del componente ganadero fue análogo al del componente forestal. La particularidad de este componente es la generación de flujos de cajas anuales, donde hubo egresos por compra de terneros y costos de producción y un ingreso a los doce meses producto de la venta. El VAN se determinó con la ecuación (16)

$$VAN_{gt} = (IG_t - EG_t) \times e^{-kG \times t} \qquad (16)$$

donde

IG_t : ingreso por venta del componente ganadero al final del período t

EG_t : egresos debido a costos operativos y compra del ganado al inicio de t

kG : tasa ajustada por riesgo obtenida para el componente ganadero mediante la ecuación (17).

$$kG = (1 + rm) \times \left(1 + \sigma_g \sqrt{\Delta t}\right) \qquad (17)$$

El precio inicial surgió de aplicar la ecuación (18).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \qquad (18)$$

donde:

x_i : observación de precio mensual
$\bar{x}$: media de la serie de precios
n : observaciones.

El riesgo del precio σ_g se obtuvo a partir de la serie de precios mensuales aplicando la ecuación (19)

$$\sigma_g = \sqrt[12]{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left[(x_{i+1}-x_i)/x_i-\bar{x}\right]} \quad (19)$$

donde:
N : número de observaciones
$(x_{i+1}-x_i)/x_i$: variación relativa del precio

Para el cálculo de las tasas de ascenso y descenso (u, d) se aplicaron las ecuaciones (7) y (8). Se realizaron las proyecciones de los precios estocásticos mediante la ecuación (9). Se calculó el nuevo flujo de fondo mediante la ecuación (20).

$$FF_{ij(t)} = \left(P_{ij(t)} \times Q_t\right) - EG_t \quad (20)$$

En este caso:

$P_{ij(t)}$: precio promedio
Q_t : cantidad total (en $\overline{kg}$) de venta de ganado
EG_t : egreso

Posteriormente, se calculó la probabilidad para cada nodo mediante la ecuación (12). Se obtuvo el flujo de fondo en función al equivalente cierto (21) que permitiría obtener $V_{ij(t)}$ mediante la ecuación (14).

$$X_t = \sum_{1}^{n} FF_{ij(t)} \times q_{ij(t)} \quad (21)$$

El valor de la opción V_{0t} se obtuvo aplicando la ecuación (15).

Análisis de sistema mediante la VOR y el VAN

En esta etapa convergen los resultados con el objeto de un análisis integral del sistema. Para la obtención de un VAN total (VAN_T) se sumó en t los VAN_f y VAN_g, de la misma manera se procede con el VOR total (VOR_T) ya que los valores son aditivos (Rocabert, 2007). En las ecuaciones (22) y (23) se puede ver la expresión matemática.

$$VAN_{Tt} = VAN_{ft} + VAN_{gt} \quad (22)$$

$$VOR_{Tt} = VOR_{ft} + VOR_{gt} \quad (23)$$

El turno óptimo (TO) de cosecha forestal en SSP se da cuando $VOR_{T(t)} > VOR_{T(t+1)}$, su expresión matemática es la (24); mientras que en el caso del VAN, la cosecha se da cuando se obtiene el máximo VAN_{Tt}.

$$VOR_T = \begin{cases} VOR_{T(t)}, & si \quad VOR_{T(t)} > VOR_{T(t+1)} \rightarrow Talar \\ 0, & si \quad no \rightarrow No\ Talar \end{cases} \quad (24)$$

Si el valor de los flujos de fondos libres $FF_{ij(t)}$ supera al valor actual esperado del próximo año $X_{t+1} \times e^{-r\Delta t}$; se ejerce la tala, siendo su valor de $V_{ij} = FF_{ij(t)}$. Caso contrario, si el va-lor esperado para el próximo año supera los flujos de fondos libres del nodo, el resultado es de $V_{ij} = 0$ difiriendo la tala al año próximo (Plantinga, 1998). La decisión en cuestión se asimila a una opción exótica barrera o *barrier option* (Hull, 2005).

Valoración de un sistema silvopastoril: caso de aplicación

Se propuso analizar el turno óptimo de cosecha de un proyecto de inversión mixto mediante la aplicación de opciones reales a un predio de 39,8 ha sobre el cual se reforestaría con *Pinus taeda* L. La producción

Tabla 1. Egresos e ingresos del componente ganadero para un ciclo de 12 meses.

Compra	*94.656*
MO	91 000
Alimento y sanidad	20 776
Costo Total	206 432
Ingreso por venta	*336 240*

Fuente: Elaboración propia. Sistema Integrado de Información Agropecuaria y Subsecretaría de Agricultura. Moneda: $AR

se estimó mediante la simulación del crecimiento de la masa boscosa. La franja de edad evaluada fue a partir del año 10 ($t = 0$), tomando un horizonte de planificación de 10 años. Los objetivos del cultivo y manejo del rodal estaban alineados con aquellos tendientes a obtener subproductos de alto valor; para ello, los destinos eran la industria de laminado y la industria de aserrío de grandes dimensiones (Ø > 30 cm); el resto de los subproductos eran para aserrío de menores dimensiones (Ø < 30 cm) y pulpa celulósica.

En la simulación del manejo de la masa forestal se previó el inicio del ciclo con 1600 plantas por hectárea, 3 intervenciones de aclareos (raleos) con una intensidad de 50% a 55% y periodicidad de 2 años entre intervención, lo que permite obtener madera de alto valor favoreciendo el volumen individual (Crechi *et al.*, 2005). Se planificó la ejecución de podas, que serían realizadas de acuerdo con la obtención de un cilindro defectuoso menor a 12 cm y una altura total de poda de 6,5 m.

La simulación se llevó a cabo mediante el software *Simulador Forestal* (Crechi *et al.*, 2005). Se consideró un índice de sitio de 22 m (edad índice 15) y una densidad final de 190 árboles por hectárea. Los parámetros iniciales (año 10) del bosque fueron: altura media 16,4 m; diámetro medio 29,9 cm; área basal 13,5 m^2/ha, un volumen de 108,7 m^3/ha y un IDR (Prodan *et al.*, 1997) de 256.

El componente ganadero estuvo constituido por la raza Braford. Se estimó alrededor de 2 animales por hectárea requiriendo un total de 80 individuos con un peso inicial de aproximadamente 120 kg y un precio de compra de $AR 9,86/kg, el peso final para comercialización se estipula en 450 kg y un precio de venta de $AR 9,34/kg. El manejo correspondió al tipo invernada con un ciclo de 12 meses. Los costos e ingresos se detallan en la tabla 1.

RESULTADOS

Estimación de los flujos de fondos

El precio promedio inicial surgió de aplicar la ecuación (1), arrojando un valor de $AR 189 por tonelada y aplicando la ecuación (17) un valor de $AR 6,16/kg de peso vivo para el periodo $t = 0$. Para el riesgo de precio forestal se aplicó la ecuación (2), utilizando cuatro series históricas de precios correspondientes a cuatro clases diamétricas;[8] para el riesgo de precio ganadero se aplicó la ecuación (19), utilizando una serie de precios históricos de ganado en pie[9], los valores obtenidos para

8 Fuente: Colegio de Ingenieros Forestales de Misiones (COIFORM). Datos mensuales para el Norte de la Provincia de Misiones entre los períodos julio de 2002 a diciembre de 2011.

9 Fuente: Sistema Integrado de Información Agropecuaria y Subsecretaría de Agricultura. Datos

Tabla 2. Valor Actual Neto del sistema entre el año 10 y 20, en gris se señala el turno.

Año	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
VAN Forestal	378 224	382 106	360 674	324 062	283 374	241 659	202 137	167 139	136 462	110 395	88 657
VAN Ganadero	129 808	129 808	129 808	129 808	129 808	129 808	129 808	129 808	129 808	129 808	129 808
VAN Total	508 032	511 914	490 482	453 870	413 182	371 468	331 946	296 947	266 270	240 203	218.466

Fuente: Elaboración propia. Moneda: $AR

la cartera de subproductos forestales (σ_s) fueron de 13,57% y 38,3% (σ_g) para el componente ganadero.

Descuento de flujos de fondos

Empleando los flujos de fondos se determinó el valor actual de las potenciales talas (ecuación (5)). La tasa ajustada por riesgo (ecuación (6)) fue de 28,39%[10] para el componente forestal y 34,58%[11] para el componente ganadero. Debido al crecimiento de la masa forestal, los mayores flujos de fondos se obtuvieron en el último periodo. Por la sensibilidad de los beneficios al factor de actualización, el criterio del descuento de flujos de fondos indicó que el mayor valor actual se produjo en el instante $t = 1$ (año 11), el resultado sugiere que la tala se realice de manera inminente con un VAN de $AR 511 914. En la tabla 2 se pude ver la evolución del VAN en el horizonte analizado. Se aprecia que el turno de cosecha del componente forestal en forma independiente es igual al turno analizado como sistema.

Opciones reales

Para la construcción del proceso estocástico de la variable de riesgo a los flujos de fondos se incorporó el riesgo de precio. Conforme fue expresado, este ascendió a 13,57% y 38,30% para el componente forestal y ganadero, respectivamente. El movimiento de ascenso y descenso, calculado mediante las ecuaciones (7) y (8), fue de $u = 1,1453$ y $d = 0,8731$ para el componente forestal y $u = 1,4667$ y $d = 0,6818$ para el componente ganadero. Para la construcción de la rejilla se aplicó la ecuación (10) y se estimaron los flujos de fondos mediante la ecuación (11). Mediante la ecuación (13), se determinaron las probabilidades binomiales para cada nodo siendo el precio de ejercicio determinado con la ecuación (12).

Los coeficientes equivalentes ciertos (ecuación (13)) para el componente forestal fueron $p = 0,6545$ y $1\text{-}p = 0,3455$ y para el componente ganadero $p = 0,4707$ y $1\text{-}p = 0,5293$. Conforme fue expuesto, se acepta la tala (o madurez de la inversión) en el nodo proyectado si los flujos de fondos (ecuación (10)) superan al valor actual esperado en el próximo ejercicio (ecuación (11)). Para estimar el valor actual, el precio de ejercicio se actualizó al tipo sin riesgo, Milanesi *et al*. (2012) sugiere una tasa $r = 5\%$ para la Argentina. Para este cálculo se aplica la ecuación (14).

Para estimar el periodo conveniente para la tala desde el punto de vista económico-financiero, la información de la rejilla se resumió en una medida de valor esperado (ecuación (15)). Los diferentes resultados obtenidos en cada nodo, deben ponderarse por sus probabilidades de ocurrencia (ecuación (12)), obteniendo de esta manera el valor del ejercicio (tala). Para llevarlos al mismo horizonte tempo-

mensuales para la Provincia de Misiones entre los períodos julio de 2008 a diciembre de 2011

10 Para ello se supuso un rendimiento de mercado de 25% (suponiendo nivel esperado de inflación).

11 Para ello se supuso un rendimiento de mercado de 25% (suponiendo nivel esperado de inflación).

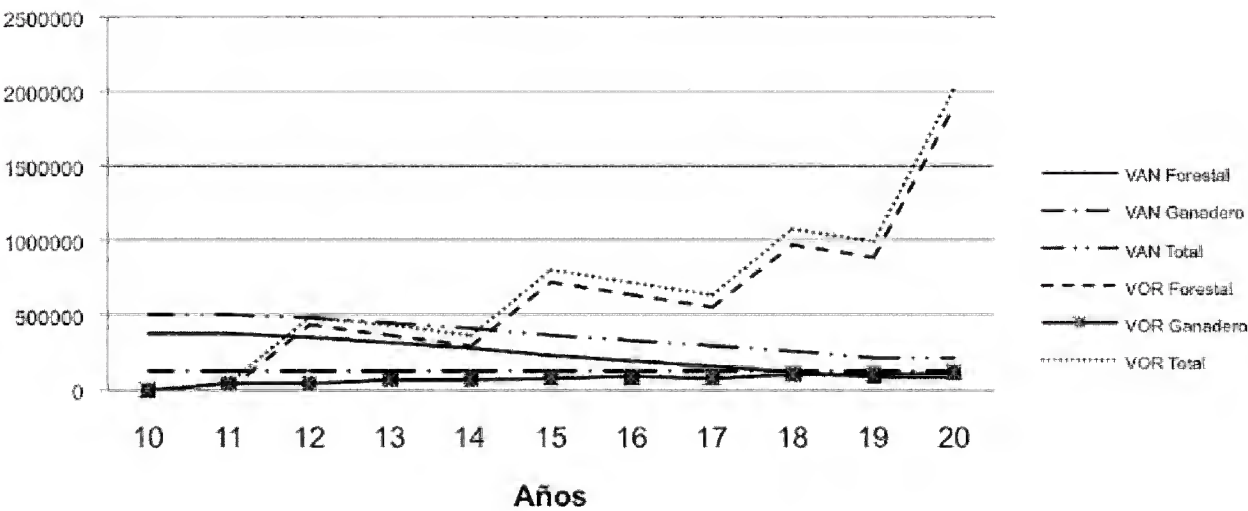


Figura 1. Comparación de la evolución del VAN y VOR por subsistema y total en $AR

ral, se actualizó por el factor libre de riesgo (r). De la tabla 3 a la tabla 12, se pueden ver los principales pasos para el desarrollo de la metodología para cada componente del sistema, mientras que en la tabla 13 se integran los resultados de las componentes del sistema para obtener un análisis integral. La decisión en juego en el último periodo se balanceó entre talar o abandonar, puesto que no había camino estratégico alternativo (venta o diferimiento).

A diferencia del criterio tradicional, el enfoque de opciones reales incorpora variables estocásticas (riesgo de precio) y la flexibilidad estratégica del ejercicio de talar. Entre los periodos $t = 0$ hasta $t = 9$, el máximo valor de ejercicio de la tala surgió en el periodo $t = 8$ (año 18) con una VOR de $AR 1 088 339.

Estos resultados difieren del criterio tradicional de descuento de flujo de fondos en más de 100%.

Tabla 3. Proyección de precios promedios del componente forestal.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
189	216.6	248,1	284,2	325,5	372,8	426,9	489,0	560,0	641,4	734,6
	165,2	189,2	216,6	248,1	284,2	325,5	372,8	426,9	489,0	560,0
		144,2	165,2	189,2	216,6	248,1	284,2	325,5	372,8	426,9
			125,9	144,2	165,2	189,2	216,6	248,1	284,2	325,5
				109,9	125,9	144,2	165,2	189,2	216,6	248,1
					96,0	109,9	125,9	144,2	165,2	189,2
						83,8	96,0	109,9	125,9	144,2
							73,2	83,8	96,0	109,9
								64	73,2	83,8
									55,8	63,9
Precio Promedio: ecuaciones (1) y (9).										48,7

Fuente: Elaboración propia. Moneda: $AR

Tabla 4. Flujo de fondos libres del componente forestal.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
581 883	837 539	1 153 997	1 538 143	2 005 086	2 566 176	3 234 572	4 033 541	4 979 071	6 097 691	7 416 481
	638 486	879 733	1 172 581	1 528 549	1 956 287	2 465 829	3 074 912	3 795 723	4 648 486	5 653 847
		670 652	893 900	1 165 267	1 491 347	1 879 789	2 344 114	2 893 614	3 543 706	4 310 129
			681 452	888 324	1 136 907	1 433 030	1 787 002	2 205 905	2 701 493	3 285 764
				677 201	866 705	1 092 450	1 362 295	1 681 640	2 059 444	2 504 855
					660 720	832 813	1 038 526	1 281 974	1 569 987	1 909 540
						634 883	791 705	977 294	1 196 857	1 455 710
							603 545	745 026	912 407	1 109 739
								567 960	695 560	845 994
									530 250	644 931
Flujo de Fondo: ecuación (10)										491 654

Fuente: Elaboración propia. Moneda: $AR

Tabla 5. Probabilidades asociadas a cada nodo

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100,00%	65,45%	42,84%	28,04%	18,35%	12,01%	7,86%	5,14%	3,37%	2,20%	1,44%
	34,55%	45,23%	44,40%	38,75%	31,70%	24,90%	19,01%	14,22%	10,47%	7,61%
	100,00%	11,94%	23,44%	30,68%	33,47%	32,86%	30,11%	26,27%	22,11%	18,09%
		100,00%	4,12%	10,80%	17,67%	23,13%	26,49%	27,74%	27,23%	25,46%
			100,00%	1,43%	4,66%	9,16%	13,98%	18,30%	21,56%	23,52%
				100,00%	0,49%	1,93%	4,43%	7,73%	11,38%	14,90%
					100,00%	0,17%	0,78%	2,04%	4,01%	6,56%
						100,00%	0,06%	0,31%	0,91%	1,98%
							100,00%	0,02%	0,12%	0,39%
								100,00%	0,01%	0,05%
									100,00%	0,00%
Probabilidades: ecuación (13)										**100,00%**

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Comparación del valor correspondiente a cada nodo ($FF_{ij(t)}$) con el valor esperado en el próximo año ($X_{t+1} \times e^{-r\Delta t}$)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
581 883	768 763	972 255	1 189 488	1 423 260	1 671 958	1 934 388	2 214 120	2 508 712	2 820 042	3 148 299
0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
-	-	1 153 997	1 538 143	2 005 086	2 566 176	3 234 572	4 033 541	4 979 071	6 097 691	7 416 481
		-	-	-	1 956 287	2 465 829	3 074 912	3 795 723	4 648 486	5 653 847
			-	-	-	-	-	2 893 614	3 543 706	4 310 129
			-	-	-	-	-	-	-	3 285 764
				-	-	-	-	-	-	2 504 855
					-	-	-	-	-	1 909 540
						-	-	-	-	1 455 710
							-	-	-	1 109 739
								-	-	845 994
									-	644 931
Comparación de cada período: ecuación (14)										-

Fuente: Elaboración propia. Moneda: $AR

Tabla 7. Valor de la Opción Real para el componente forestal

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-	-	494 319	431 222	367 908	308 173	254 229	207 490	167 633	134 363	106 958
	-	-	-	-	620 115	613 883	584 525	539 708	486 664	430 448
		-	-	-	-	-	-	760 212	783 426	779 546
			-	-	-	-	-	-	-	836 601
				-	-	-	-	-	-	589 203
					-	-	-	-	-	284 547
						-	-	-	-	95 429
							-	-	-	21 946
								-	-	3 312
									-	296
										-
-	-	447 279	371 156	301 218	722 951	643 113	558 124	983 730	895 519	1 909 532
Valor de la opción: ecuación (15)										

Fuente: Elaboración propia Moneda: $AR

Tabla 8. Proyección de precios promedios del componente ganadero

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,16	9,04	13,26	19,45	28,52	41,83	61,35	89,98	131,98	193,57	283,90
	4,20	6,16	9,04	13,26	19,45	28,52	41,83	61,35	89,98	131,98
		2,87	4,20	6,16	9,04	13,26	19,45	28,52	41,83	61,35
			1,95	2,87	4,20	6,16	9,04	13,26	19,45	28,52
				1,33	1,95	2,87	4,20	6,16	9,04	13,26
					0,91	1,33	1,95	2,87	4,20	6,16
						0,62	0,91	1,33	1,95	2,87
							0,42	0,62	0,91	1,33
								0,29	0,42	0,62
									0,20	0,29
Precio Promedio: ecuaciones (18) y (19)										0,13

Fuente: Elaboración propia. Moneda: $AR

Tabla 9. Flujo de fondos libres del componente ganadero

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15 448	118 995	270 864	493 608	820 301	1 299 454	2 002 218	3 032 946	4 544 693	6 761 939	10 013 924
	-55 151	15 448	118 995	270 864	493 608	820 301	1 299 454	2 002 218	3 032 946	4 544 693
		-103 287	-55 151	15 448	118 995	270 864	493 608	820 301	1 299 454	2 002 218
			-136 106	-103 287	-55 151	15 448	118 995	270 864	493 608	820 301
				-158 483	-136 106	-103 287	-55 151	15 448	118 995	270 864
					-173 740	-158 483	-136 106	-103 287	-55 151	15 448
						-184 142	-173 740	-158 483	-136 106	-103 287
							-191 234	-184 142	-173 740	-158 483
								-196 070	-191 234	-184 142
									-199 367	-196 070
Flujo de Fondo: ecuación (20)										-201 615

Fuente: Elaboración propia. Moneda: $AR

Tabla 10. Probabilidades asociadas a cada nodo del componente ganadero

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1000,00%
100,00%	47,07%	22,16%	10,43%	4,91%	2,31%	1,09%	0,51%	0,24%	0,11%	0,05%
	52,93%	49,83%	35,18%	22,08%	12,99%	7,34%	4,03%	2,17%	1,15%	0,60%
	100,00%	28,01%	39,56%	37,24%	29,22%	20,63%	13,60%	8,53%	5,16%	3,04%
		100,00%	14,83%	27,92%	32,85%	30,93%	25,48%	19,19%	13,55%	9,11%
			100,00%	7,85%	18,47%	26,08%	28,65%	26,97%	22,85%	17,93%
				100,00%	4,15%	11,73%	19,33%	24,26%	25,69%	24,19%
					100,00%	2,20%	7,24%	13,64%	19,26%	22,67%
						100,00%	1,16%	4,38%	9,28%	14,56%
							100,00%	0,62%	2,61%	6,14%
								100,00%	0,33%	1,53%
									100,00%	0,17%
Probabilidades: ecuación (13)										**100,00%**

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Comparación de flujo de fondo libre en t con el valor presente esperado t+1

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15 448	26 824	38 784	51 356	64 573	78 468	93 075	108 431	124 574	141 545	159 386
-	**1**	**2**	**3**	**4**	5	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
-	118 995	270 864	493 608	820 301	1 299 454	2 002 218	3 032 946	4 544 693	6 761 939	10 013 924
		-	118 995	270 864	493 608	820 301	1 299 454	2 002 218	3 032 946	4 544 693
			-	-	118 995	270 864	493 608	820 301	1 299 454	2 002 218
			-	-	-	-	118 995	270 864	493 608	820 301
				-	-	-	-	-	-	270 864
					-	-	-	-	-	-
						-	-	-	-	-
							-	-	-	-
								-	-	-
									-	-
Comparación de cada periodo: ecuación (14)										-

Fuente: Elaboración propia Moneda: $AR

Tabla 12. Valor de la Opción Real para el componente forestal

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-	56 014	60 019	51 486	40 277	30 034	21 784	15 533	10 956	7 674	5 349
	-	-	41 867	59 814	64 137	60 208	52 379	43 418	34 830	27 297
		-	-	-	34 769	55 883	67 114	70 002	67 114	60 848
			-	-	-	-	30 319	51 979	66 883	74 745
				-	-	-	-	-	-	48 563
					-	-	-	-	-	-
						-	-	-	-	-
							-	-	-	-
								-	-	-
									-	-
										-
-	53 282	54 308	80 350	81 947	100 419	102 140	116 516	118 215	112 542	131 497
Valor de la opción: ecuación (15)										

Fuente: Elaboración propia. Moneda: $AR

Tabla 13. Valor Opción Real del sistema entre el año 10 y 20, en gris se señala el turno

Año	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*	*15*	*16*	*17*	*18*	*19*	*20*
VOR Forestal	-	-	447 279	371 156	301 218	722 951	643 113	558 124	983 730	895 519	1 909 532
VOR Ganadero	-	44 464	45 889	68 392	70 531	86 907	89 240	84 290	104 609	100 760	117 660
VOR Total	-	44 464	493 168	439 548	371 749	809 858	732 353	642 414	1 088 339	996 279	2 027 193

Fuente: Elaboración propia. Moneda: $AR

Además, el riesgo en el modelo VAN se incorporó íntegramente en el factor de actualización y los periodos fueron tratados sin flexibilidad alguna (solamente tala) y el resultado se encontró en parte influenciado por el impacto de la tasa ajustada por riesgo en el flujo de fondos esperado estático. En la figura 1 se expone el perfil de beneficios en ambos enfoques.

DISCUSIÓN

Se expuso un modelo alternativo al clásico método de descuento de flujos de fondos, para estimar la conveniencia económica-financiera y temporal de ejercer la opción de talar una masa forestal sujeta a un manejo silvopastoril, siendo esto correspondiente con la madurez del proyecto de inversión. Se propone aplicar la teoría de opciones reales para incorporar en el marco de decisión la posibilidad de diferir la tala y tomar en cuenta el proceso aleatorio del precio. La decisión consiste en comparar cada escenario proyectado *versus* el valor actual promedio de los escenarios del próximo ejercicio conforme a Plantinga (1998); en términos de opción financiera la decisión se asemeja a una *barrier option* del tipo *knock-in*.

En el caso analizado, el método de descuento de flujos de fondos sugiere talar en el año 11 obteniéndose un VAN de $AR 511 914 y utilizando una tasa ajustada por riesgo (k) de 28,39%[12] siendo muy superior a las planteadas por Monicault y Delvalle (2009) y Fassola *et al.* (2004) los cuales no mencionan el criterio de selección y adicional por riesgo de mercado utilizado en el cálculo.

El resultado se debió a la alta sensibilidad negativa de los flujos al factor de descuento, reafirmando lo mencionado por Soares *et al.* (2005), además de que la variable precio se supuso constante en todo el periodo de proyección.

La aplicación del método de opciones reales, por el contrario, sugiere que el máximo valor se obtiene en el último periodo. Descartada esta opción, que no posee flexibilidad, el segundo momento óptimo se encontró en el año 18 con un ingreso con una VOR $AR 1 101 944, siendo superior al VAN en más de 100% ya que el mismo no permite el desarrollo futuro del bosque.

Estos valores coinciden con lo afirmado por Sant´Anna y Nogueira (2010) y Moreira *et al.* (2000). Además, se observó que la componente ganadera en el sistema no altera la decisión de tala ya que en forma independiente (sólo componente forestal) o como sistema se obtuvo el turno óptimo en el año 18.

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista económico- financiero el enfoque de OR presenta importantes ventajas en contraposición al clásico VAN debido a su robustez, ya que incorpora flexibilidad estratégica y comporta-

12 Metodología CAPM (*Capital Asset Pricing Model*).

miento estocástico de los precios con base en series históricas; de esta manera elimina el uso de la tasa ajustada por riesgo.

Esta cuestión no se tiene en cuenta en el VAN, siendo la tasa ajustada por riesgo constante en la vida del proyecto, por lo cual supone un escenario constante en todo el horizonte de planificación, siendo esto un enfoque muy limitado, en especial tratándose de proyectos forestales, dado que presentan horizontes temporales extensos.

REFERENCIAS

Bettinger, P., K. Boston, J.P. Siry y D.L. Grebner. 2009. Forest management and planning. 1a. ed. Academic Press, California. 360 p.

Black, F. y M. Scholes. 1973. The pricing of options and corporate liabilities. Journal of Political Economy 81(3):637-659.

Blasco, C., S. Carenzo y E. Astrada. 2005. Evaluación de un sistema silvopastoril sobre vinales en Formosa, Argentina. Revista Iberoamericana de Economía Ecológica 2(1):57-68.

Brennan, M. y E. Schwartz. 1985. A new approach to evaluating natural resource investment. Midland Corporate Financial Journal 1(3):37-47.

Cerruto R., C. Leite, J. Gonçalves y M. Lopez da Silva. 2007. Estimativa do abatimento de erosão aportado por um sistema agrossilvipastoril e sua contrubução econômica. Revista Árvore 31(2):285-293.

Chidiak, M., A. Moreyra y C. Greco. 2003. Captura de carbono y desarrollo forestal sustentable en la Patagonia Argentina: Sinergias y Desafíos. Documento CENIT-CEPAL-UDESA. 136 p.

*URL:*http://www.territorioscentroamericanos.org/ecoagricultura/Documents/capturadecarbonoydesarrolloforestal.pdf (último acceso 08/08/2013).

Colcombet, L., E. Crechi, A. Keller, N. Pachas, H. Fassola, S. Lacorte y J. Esquivel. 2010. Comparación preliminar de resultados financieros y económicos de proyectos forestales, ganaderos y silvopastoriles en Misiones. Acta 14[as] Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. UNAM - EEA Montecarlo, INTA. 86 p.

Copeland, T., T. Koller y J. Murrin. 2000. Valuation: measuring and managing the value of companies. 3[a] ed. Wiley. Nueva York. 490 p.

Cox, J., S. Ross y M. Rubinstein. 1979. Option pricing: a simplified approach. Journal of Financial Economics 7(3):229-263.

Crechi, E., R. Fernández, A. Friedl y J. Falher. 2005. Efectos de raleo en *Pinus taeda*, Norte Misionero. Revista Idia 11(8):41-45.

Crechi, E., H. Fassola y A. Friedl. 2005. Simulador Forestal. Revista Idia 11(8):46-50.

Damodaran, A. 2002. Investment Valuation. 2[a] ed. Wiley. Nueva York. 992 p.

Dixit, A. y R. Pindyck. 1994. Investment under uncertainty. 1[a] ed. Pricenton University Press. Nueva Jersey. 476 p.

Fassola, H., S. Lacorte, J. Esquivel, F. Colcombet, F. Moscovich, E. Crechi, N. Pachas y A. Keller. 2004. Sistemas silvopastoriles en Misiones y NE

de Corrientes y su entorno de negocio. Directorio de información Instituto Nacional del Tecnología Agropecuaria (INTA).

*URL:*http://anterior.inta.gob.ar/montecarlo/info/documentos/forestales/sistsilvopastoril.PDF (último acceso 08/08/2013).

Grainger, M. 1968. Problems affecting the use of Faustmann's formula as a valuation tool. New Zealand Journal of Forestry (1968) 13(2):168-183.

Hull, J. 2005. Futures, options and other derivatives. 6ª ed. Prentice Hall. Nueva Jersey. 816 p.

Kulatilaka, N. 1988. Valuing the flexibility of flexible manufacturing systems. IEEE Transactions in Engineering Management 35(4):250-257.

Malliaris, A. G. y W.A. Brock. 1982. Stochastic methods in economics and finance. 1ª ed. Holanda del Norte, Amsterdam. 317 p.

Margrabe, W. 1978. The value of an option to exchange one asset for another. Journal of Finance 33(1):177-186.

Markowitz, H. 1991. Portfolio selection: efficient diversification of investments. 2ª ed. Blackwell Publishers. Cambridge, Massacchusetts. 384 p.

Mason, S. y R. Merton. 1985. The Role of contingent claims analysis in corporate finance. Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University. Home--wood Irwin, Nueva York. 65 p.

Mc Donald, R. y D. Siegel. 1981. Option pricing when the underlying asset is non-stored. Discussion Papers number 512. Center for Mathematical Studies in Economics and Management Science, Northwestern University. Evaston, Illinois. 12 p.

Merton, R. 1973. The theory of rational options princing. The Bell Journal of Economics and Management Science 4(1):141-183.

Miller, R. A. y K. Voltaire. 1983. A stochastic analysis of the tree paradigm. Journal of Economic Dynamics & Control 6(1):371-386.

Milanesi, G. y H. Vigier. 2010. Árboles de decisión, opciones reales y enfoque integrado en mercados completos e incompletos. Anales Asociación Argentina de Economía Política. Buenos Aires. p:1-30.

Milanesi, G. 2011. Opciones reales: teoría y casos prácticos. 1ª ed. Induvio, Buenos Aires. 156 p.

Milanesi, G., G. Woitschach y D. Broz. (2012). Aplicación de la teoría de opciones reales a la determinación del momento óptimo de cosecha forestal. Rev. FCA UNCUYO. 44(2):65-78.

Monicault, L. A. y P. Delvalle. 2009. Evaluación Económico–Financiero de un Sistema Silvopastoril (SSP). Documeto técnico INTA online. *URL:*http://inta.gob.ar/documentos/evaluacion-economico2013financiero-de-un-sistema-silvopastoril-ssp/ (último acceso 08/08/2013).

Moreira A., E. Reis, K. Rocha y L. Carvalho. 2000. A valoração das concessões nas florestas nacionais da Amazônia: uma abordagem com

opções reais. Pesquisa e Planeamento Econômico 30(3):327-354.

Mun, J. 2005. Real options analysis: tools and techniques for valuing strategic investment and decisions. 2ª ed. Wiley. Nueva York. 704 p.

Musálem, M.A. 2002. Sistemas agrosivopastoriles: una alternativa de desarrollo rural sustemtable para el trópico mexicano. Revista Chapingo 8(2):91-100.

Myers, S. y S. Majd. 1990. Abandonment value and project life. Advances in Futures and Options Research 4:1-21.

Myers, S. 1977. Determinants of corporate borrowing. Journal of Financial Economics 5(2):147-175.

Paddock, J., D. Siegel y J. Smith. 1988. Option valuation of claims on physical assets: the case of Offshore Petroleum Lease. Quaterly Journal of Economics 103(3):479-508.

Pindyck, R. 1988. Irreversible investment, capacity choice and the value of the firm. American Economic Review 78(5):969-985.

Plantinga, A. 1998. The optimal timber rotation: an option value approach. Forest Science, Society of American Foresters 44(2):192-202.

Pratt, S. y R. Grabowski. 2008. Cost of capital: applications and examples. 3ª ed. John Wiley & Sons Nueva Jersey. 778 p.

Prodan, M., R. Peters, F. Cox y P. Real. 1997. Mensura Forestal. 1ª ed. Costa Rica. Instituto Interamericano para la Agricultura - Gesellschaft für Zusammenarbeit (IICA-GTZ). 511 p.

Rocabert, J. (2007). Los criterios valor actual neto y tasa interna de rendimiento. Revista electrónica sobre la enseñanza de la Economía Pública 2(1):1-11.

Sant´Anna, A. y J. Nogueira. 2010. Valoração econômica dos serviços abientais de florestas nacionais. Revista de Administração e Negócios da Amazônia 2(1):82-108.

Schneider, P. 2002. Manejo florestal: planejamento da produção florestal. Santa María, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Ciências Florestais. 492 p.

Smit, H. 1997. Investment analysis of offshore concessions in The Netherlands. Financial Management 26(2):5-17.

Smith, J. 2005. Alternative approach for solving real options problems. Decision Analysis 2(2):89-102.

Soares, T.S., R. M. Carvalho, A. Bartolomeu do Vale. 2003. Avalição econômica de um povoamento de Eucalyptus grandis destinado a multiprodutos. Revista Árvore. 27(5): 689-694.

Thomson, T.A. 1992. Optimal forest rotation when stumpage prices follow a difusion process. Land Economics 68(3):329-342.

Trigeorgis, L. y S. Mason. 1987. Valuing Managerial Flexibiliy. Midland Corporate Finance Journal 5(1):14-21.

Trigeorgis, L. 1988. A conceptual options framework for capital budgeting. Advances in Futures and Options Research 4(3):145-167.

Trigeorgis, L. 1997. Real options: managerial flexibility and strategy in resource allocations. 2ª ed. MIT Press, Cambridge. 427 p.

Yin, R. y D. Newman. 1997. When to cut a stand of trees? Natural Resource Modeling 10(3):251-261.

Manuscrito recibido el 8 de abril de 2012.
Aceptado el 8 de agosto de 2013.

Este documento se debe citar como:
Milanesi, G., D.R. Broz y G.B. Woitschach. 2013. Opciones reales para determinar el turno óptimo en sistemas silvopastoriles: análisis de inversión. Madera y Bosques 19(3):81-98.

MADERA Y BOSQUES Vol. 19 Núm. 3
Se terminó de imprimir en el mes de diciembre de 2013
en los talleres de Tavera Hermanos, S.A. de C.V.
Av. Lázaro Cárdenas 3052. Col. Chapultepec Sur.
CP 58260, Morelia, Michoacán.

La edición consta de 300 ejemplares
más sobrantes para reposición.



Madera y Bosques 19(3), 2013

CONTENIDO